

أوليڤييه إسلانجيه

مقدمة فى علم الفلك

ترجمة

طارق كامل

مراجعة

د.السيد عطا

مقدمة فى علم الفلك

- الكتاب: مقدمة فى علم الفلك

INTRODUCTION AL ASTRONOMIE

- الكاتب: أوليڤييه إسلانجيه OLIVIER ESSLINGER
- الطبعة الأولى ٢٠١٧.
- الكتاب الأصلى صادر باللغة الفرنسية ويصدر بإذن خاص من المؤلف.
- طبع فى مطابع الهيئة المصرية العامة للكتاب، كورنيش النيل، رملة بولاق، القاهرة.

ت: ٢٥٧٧٥١٠٩ /٢٥٧٧٥٠٠٠

فاكس: ٢٥٧٥٤٢١٣ (٠٠٢٠٢)

ص. ب: ٢٣٥ــ الرقم البريدى: ١١٧٩٤رمسيس

WWW.gebo.gov.eg

Email: info@gebo.gov.eg

إسلانجيه، أوليڤييه .

مقدمة فى علم الفلك/ أوليڤييه إسلانجيه؛ ترجمة: طارق كامل؛ مراجعة: السيد عطا .ــ القاهرة: الهيئة المصرية العامة للكتاب، ٢٠١٧.

٣٣٢ ص؛ ٢٣,٥ سم. ــ (الألف كتاب الثانى)

تدمك ٤ ١١٤١ ٩١ ٩٧٧ ٩٧٨

١ ــ الفلك.

أ ــ كامل، طارق (مترجم)

ب ــ عطا، السيد (مراجع)

جـ ــ العنوان

رقم الإيداع بدار الكتب. ٣٢٩٣ / ٢٠١٧

I.S.B.N - 978 – 977 – 91 – 11 41 – 4

ديوى ٥٢٠

الألف كتاب الثانى

نافذة على الثقافة العالمية

أوليڤييه إسلانجيه

مقدمة فى علم الفلك

ترجمة

طارق كامل

مراجعة

د. السيد عطا



الهيئة المصرية العامة للكتاب
٢٠١٧

الألف كتاب فى سطور .....

صدر مشروع الألف كتاب الأول عام ١٩٥٥ بإشراف الإدارة العامة للثقافة، التابعة لوزارة التربية والتعليم. وقد اهتم بأمهات الكتب العالمية والكلاسيكيات، كما شمل العلوم البحتة، والعلوم التطبيقية، والمعارف العامة، والفلسفة وعلم النفس، والديانات، والعلوم الاجتماعية، واللغات، والفنون الجميلة، والأدب بفروعه، والتاريخ والجغرافيا والتراجم. وتوقف العمل به عام ١٩٦٩.

صدر مشروع الألف كتاب الثانى عام ١٩٨٦عن الهيئة المصرية العامة للكتاب. وقد اهتم بترجمة الكتب الحديثة محاولة منه للاتصال بالثورة العلمية والثقافة العالمية المعاصرة .

وقد قُسمت إصدارات المشروع إلى ١٩ فرعا هى: الموسوعات والمعاجم، والدراسات الاستراتيجية وقضايا العصر، والعلوم والتكنولوجيا، والاقتصاد والعلوم الإدارية، ومصر عبر العصور، والكلاسيكيات، والفن التشكيلى والموسيقى، والحضارات العالمية، والتاريخ، والجغرافيا والرحلات، والفلسفة وعلم النفس، والعلوم الاجتماعية، والمسرح، والطب والصحة، والآداب واللغة، والإعلام، والسينما، وكتب غيرت الفكر الإنسانى، والأعمال المختارة.

(انظر القائمة آخر الكتاب)

المحتويات

تقديم المترجم

على نهج كوبرنيكوس ١١

[١] نشأة علم الفلك

الحركة الظاهرية للكواكب ٢٧

بدايات علم الفلك ٢٩

علم الفلك فى مصر القديمة ٣١

علم الفلك الإغريقى.................................... ٣٤

علم الفلك فى أرض الإسلام.................................... ٣٧

نيكولا كوبرنيكوس.................................... ٣٩

تايكو براه ٤٠

جوهان كبلر.................................... ٤٢

جاليليو.................................... ٤٤

إسحق نيوتن ٤٦

ميكانيكا السماء ٤٨

[٢] الفيزياء الفلكية والرصد الفلكى

الموجات الضوئية ٥٠

التحليل الطيفى ٥٣

تأثير دوبلر.................................... ٥٦

المِرْقَب الكاسر والمرقب العاكس (التلسكوب) ٥٨

النقاء الزاوىّ المرتفع ٦١
علم الفلك الراديوى ٦٣
الأطوال الموجية الأخرى ٦٥

[٣] المجموعة الشمسية الداخلية

نشأة المجموعة الشمسية.................................... ٦٩
نشأة الأغلفة الجوية ٧٢
نشأة الغلاف الجوى لكوكب الزُّهَرة ٧٤
الغلاف الجوى للأرض والمِرِّيخ ٧٦
عطارد.. ذلك العالم الغامض ٧٨
كوكب الزهرة ٨٠
الأرض: الغلاف الجوى والغلاف المغناطيسي ٨٣
التكوين الداخلى والألواح التكتونية ٨٧
الاحتباس الحرارى فى كوكب الأرض ٨٩
قمر الأرض ٩١
استكشاف القمر ٩٤
سطح القمر ٩٦
نشأة القمر ٩٩
كوكب المريخ ١٠٠
المياه على المريخ ١٠٣
استكشاف المريخ بعد عام ٢٠٠٠ .... ١٠٧
الكويكبات ١٠٩
النيازك ١١٢

[٤] المجموعة الشمسية الخارجية

المُشترِى المتعملق الغازى ١١٤
أقمار المشترى ١١٧
زحل الكوكب المتأنق ١١٩

القمر تيتان ١٢٢
أونسلادوس ١٢٣
الأقمار التابعة لزحل ١٢٥
كوكب أورانوس ١٢٦
الكوكب نبتون ١٢٨
بلوتو والكواكب المتقزمة الخارجية ١٣٠
المُذنَّبات ١٣٢
حزام كويبر وسحابة أورت ١٣٤

[٥] الشمس والنجوم

الشمس ١٣٧
السطح والبقع الشمسية والمغناطيسية ١٣٩
الكروموسفير والهالة والرياح الشمسية ١٤٢
حركة النجوم وبعدها ١٤٥
إضاءة النجوم وحرارتها ١٥٠
حجم النجوم وكتلتها ١٥٣
مصدر طاقة النجوم ١٥٦
التفاعلات النووية ١٥٨
خط التتابع الرئيس ١٦٠
المتعملقات الحمراء ١٦٣
النجوم المتغيرة ١٦٥

[٦] نهاية حياة النجوم

السُدُم الكوكبية ١٦٨
مبدأ عدم اليقين ١٦٩
المتقزمات البيضاء ١٧٢
نجوم النوفا ١٧٤
نهاية النجوم الكبيرة ١٧٥

نجوم السوبرنوفا ١٧٧
التحليل النووى ١٧٩
النجوم النيوترونية ١٨١
نجوم البلسار النابضة ١٨٢
أشعة إكس ١٨٦
رشقات أشعة جاما ١٨٨

[٧] النسبية والثقوب السوداء
ملاحقة المكان المطلق ١٩٣
النسبية الخاصة ١٩٦
تمدد الزمان ١٩٩
المكان والكتلة والمكان- الزمان ٢٠٢
الجاذبية والعجلة ٢٠٤
النسبية العامة ٢٠٧
التحقق من النسبية ٢٠٨
الموجات الجذبوية ٢١١
الثقوب السوداء ٢١٤
ما حول الثقب الأسود ٢١٦
رصد الثقوب السوداء ٢١٩
غبار ما بين النجوم ٢٢٢
غاز ما بين النجوم ٢٢٤
نشأة النجوم ٢٢٧
نجوم (تى الثور) وأجرام (هربيج هارو) ومناطق (إتش أى أى) ٢٣٠

[٨] المَجرَّات
دراسة تاريخية لدرب التبَّانة ٢٣٢
هارلو شابلى والقيفاويات ٢٣٤
المجرة ٢٣٧

المركز المَجَرِّى ٢٤٠
طبيعة السدم ٢٤١
الأنواع المختلفة من المجرات ٢٤٤
الأذرع الحلزونية ٢٤٦
المجرات المتقزمة والمجرات المتعملقة ٢٤٨
المجرات ذات النواة النشطة ٢٥٠
الكوازارات ٢٥٢
النموذج الموحد للمجرات النشطة ٢٥٤
تبعات النموذج الموحد ٢٥٧
الأدلة الرصدية ٢٥٩
اندماج المجرات ٢٦١
مجموعات المجرات والتجمعات المجرية ٢٦٣
التجمعات المجرية الفائقة والتكوينات على المستوى الأضخم.......... ٢٦٥

كرونولوچيا تاريخية لعلم الفلك ٢٦٩
تعريف المؤلف والمترجم ٢٧١

مقدمة المترجم

على نهج كوبرنيكوس

تبدو حركة النجوم فى الكون بطيئة بشكل لا يمكن معه للعين المجردة أن تدركه على مدار حياة الإنسان. وتتميز النجوم على عكس باقى الأجرام السماوية بكونها مكمن تفاعلات نووية حرارية تجعلها مضيئة بذاتها. وجدير بالذكر أن تلك الصور الهندسية التى تبدو لتشكيلات النجوم وهى الكوكبات، لا تعبر عن حقيقة فيزيائية، أى أن نجمين متجاورين فى إحدى الصور النجمية يمكن أن يكونا متباعدين تماما بعضهما عن البعض، ولا يبدوان قريبين إلا إذا كنا نراهما من منظور الأرض.

وفضلا عن الكوكبات أو الصور النجمية، والتى لا تعبر عن مواقع حقيقية للنجوم، ثمة تجمعات حقيقية للنجوم يمكن رصدها بمِرْقَب صغير.

يمكننا أن نرصد فى كل مكان تجمعات تمتد لتشمل عشرات من النجوم مترابطة قليلاً وتبدو موجودة بالأساس فى المنطقة الوسطى بمجرتنا. ونطلق عليها مجموعات النجوم المفتوحة أو المجموعات المَجَرِيَّة. وتتكون بشكل عام مشكلة من النجوم الأكثر شبابا. والنموذج الشهير هو مجموعة الثريا التى تبدو مكوناتها الأكثر بريقا مرئية بالعين المجردة. أما المجموعات الكروية فتضم الآلاف من النجوم القديمة.

وتضم المَجَرَّة نحو مائة مليار من النجوم التى يمكن تشبيهها بأنها العملة النحاسية للكون. والمجرة بدورها هى وحدة بناء الكون، الذى يتشكل من مئات المجرات. بنظرة المرقب يبدو الكون مشتتا وتبدو المجرات فى حالة هروب، ويزداد تباعدها شيئا فشيئا بلا حدود لتبدو اللوحة الكبيرة المرصعة ممتدة بلا بداية ولا نهاية.

فى ليلة من ليالى الصيف، لن تخطئ التعرف على شريط أبيض اللون يمتد عبر السماء الشاسعة؛ إنها مجرتنا، درب التبَّانة أو درب اللبَّانة، والتى أطلق عليها قديما الاسم درب التبانة أو الطريق اللبنى تشبيها لها بطريق ينتشر به القش أو لتشبيهها باللبن المسكوب. تلك المنطقة الضبابية الخفيفة لا يمكن إدراكها إلا فى ليالٍ غير مقمرة وفى وقت تصفو به السماء. ذلك الأثر الأبيض الممتد عبر السماء ليس سوى مجرتنا. وبالنظر إليها من الداخل، وباستخدام أحد المَرَاقِب، يمكن رؤية أجرام جديدة بداخلها.

مجرة وحيدة فى ركن منزوٍ من أركان الكون وعلى طرفها نجم متوسط اللمعان هو شمسنا الدافئة التى تشد بجاذبيتها كواكب وكويكبات ومُذنَّبات المجموعة الشمسية. فى هذا الركن المنزوى يقع كوكبنا، موطننا الكونى الذى نشأنا على سطحه ونشأ الوعى الإنسانى. إنه ليس الكوكب الوحيد فى ذلك النظام الشمسى الصغير، بل ثمة تسعة كواكب، قام علماء الفلك بتقسيمها لمجموعتين حسب تركيباتها؛ المجموعة الداخلية وهى مكونة من الكواكب الصغيرة والصخرية والكثيفة وهى عطارد والزُّهَرة والأرض والمِرِّيخ، والمجموعة الخارجية زحل والمُشترِى وأورانوس ونبتون وفى الظلام البارد بلوتو. والكواكب الخمسة الأولى - عطارد والزهرة والمريخ وزحل والمشترِى - هى التى يمكن رؤيتها بالعين المجردة حيث تبدو لامعة مثل باقى نجوم الليل السرمدى. وتأتى إضاءة تلك الكواكب من الضوء الذى تبعثه الشمس، بما أن الكواكب لا تشع ضوءا مرئيا بذاتها. ويمكننا أن نرى كوكب عطارد فى مداره حول الشمس، حين تكون السماء مضيئة عند الأفق، وبشكل أسهل كوكب الزهرة شديد

اللمعان. كل من هذين الكوكبين يمكن رؤيتهما مساء أو صباحا ويتخلل ذلك فترات غياب. والزهرة هو الكوكب الذى يُسمى كثيرا بشكل خاطئ نجم الراعى أو نجمة القمر لدى الفلاحين المصريين. أما المريخ فحين يكون مرئيا يبدو على هيئة نقطة مضيئة شبيهة بنجم متوسط اللمعان وذات لون برتقالى. والمشترى حين يكون مرئيا، فإنه يتميز عن باقى النجوم بلمعانه الشديد. أما زحل فى المقابل فمن الوارد ألا يمكن تمييزه عن سائر النجوم بالنسبة للعين غير المدربة. هكذا، نجح الإنسان قديما، بعينه المجردة، فى تمييز خمسة كواكب سيارة تتحرك بين مجموعات النجوم بخُطًا خاصة ومسار خاص بين الكوكبات أو الصور النجمية التخيلية؛ بالإضافة إلى خاصية الشروق والغروب الظاهرية للكوكبات ولكل الأجرام السماوية والناجمة عن دوران الأرض حول محورها.

كل النجوم تشرق مثل الشمس من الشرق وتغرب فى الغرب، وهو ما يمكن ملاحظته بالعين المجردة. إنها حركة الأرض حول محورها هى التى تتسبب فى ذلك الوهم. فالأرض فى الحقيقة هى التى تتحرك. وحركتها حول الشمس هى التى تؤدى إلى تغير مجموعات النجوم بتغير الوقت. وقسَّم الإنسان قديما النجوم لمجموعات تدعى الكوكبات لتمييز أقسام السماء، وشبهها بأساطيره الخاصة وبمعتقداته وبأحداث حياته التى تدور على الأرض. فالسماء مقسمة، بهذا الشكل، لمناطق تدعى الكوكبات ولا يتغير شكلها إلا بمرور ملايين السنين، ويصل عددها إلى ثمانية وثمانين وفقا للاتفاقات الدولية. وثمة مجموعة من هذه الكوكبات تسمى الكوكبات الكلاسيكية وعددها ثمانية وأربعون، وهى تتكون من النجوم المرئية فى سماء نصف الكرة الشمالى، ولن يصعب عليك تمييزها بالعين المجردة باستخدام خريطة صغيرة: فيمكنك رؤية الثُّرَيَّا والثور والدب الأكبر وراعى الشتاء والجبار وممسك الأعِنَّة ونجم الشِّعْرَى اليمانية والشعرى الشامية والعناز وسائق العربة. وفى شهر ديسمبر تتلألأ مجموعة نجوم جنوبية أشبه بالفانوس هى الجبار بنجومها الثلاثة اللامعة، حيث تشبه فى حجمها وتوزيع النجوم بها رحلة راعى الشتاء، ونجم السِّمَاك

الرامح هو ألمع نجومها. والصور النجمية التى لا تموت تشعل حلم البشر منذ قديم الأزل وتصنع فى أذهاننا كوكبات من الأسئلة. قبة سماوية تتوج مسرح الحياة الإنسانية، وإليها نقل الإنسان روح الأسطورة الإنسانية وصور الأرض. ونسجت الميثولوجيا الإغريقية أسماء معظم النجوم والكوكبات فى القبة السماوية الشمالية: ذات الكرسى كاسيوبيا زوجة قيفاوس الملتهب ملك إثيوبيا. فرساوس مروض بيجاسوس أو البيجاز الفرس الأعظم المجنح. وفى سماء الجنوب، قرب خط الاستواء السماوى، سائق العربة والتوأمان والجبار، وفى الصيف العقرب والقوس، وبالقرب منهما قلب المجرة درب التبانة. أما عن كوكبات سماء نصف الكرة الجنوبى، فترجع تسمياتها للبحارة الذين أعطوا لسماء الجنوب مسمياتها أثناء رحلات استكشاف العالم الجديد. أما علماء عصر النهضة فقد أثرت اهتماماتهم بالتقنيات على اختياراتهم على نحو ما تشهد تسمياتهم: الكوثل أو مؤخر السفينة والساعة والتلسكوب والميكروسكوب وآلة السدس والبوصلة والنهر. ولا تنم الكوكبات الأربعون الجديدة، كوكبات العالم الجديد، عن ثراء فى الخيال مشابه لخيال الحضارات القديمة. هكذا، تنقسم الكوكبات إلى كلاسيكية وحديثة. الأولى تكشف لنا عن ابتكارات ميثولوجية؛ ثعابين ووحوش بحرية وتنانين وحيوانات مألوفة كالأسد والدبين والجدى. والثانية تحمل معانى أقل شعرية وتتعلق غالبا بالبحر.

مشهد السماء فى الليل يبعث على الوحدة والعزلة لأن عالمنا القريب لا يضم عمليا سوى الشمس، وأقرب النجوم إلينا يبدو بعيدا لدرجة أنه لا يبدو منها سوى نقطة ضوئية واهنة.

فى الليل تبدو القبة السماوية وكأنها تتحرك بانتظام من الشرق إلى الغرب مثل القمر والشمس نهارا. تلك الحركة الظاهرية تعود إلى دوران الأرض حول محورها من الغرب إلى الشرق. أما عن الحركة الحقيقية للأجرام السماوية فى الكون، فهى أكثر تعقيدا وأكثر بطئا بكثير ولا يمكن رصدها إلا بمرور قرون. وفى نصف الكرة الأرضية الشمالى، تبدو القبة السماوية وكأنها تتحرك عكس

اتجاه عقارب الساعة حول محور متعامد على نجم متوسط اللمعان يدعى النجم القطبى. أما فى نصف الكرة الأرضية الجنوبى، فتبدو السماء وكأنها تتحرك فى اتجاه عقارب الساعة. وبالنسبة لراصد يقع فى نصف المسافة بين خط الاستواء وأى من القطبين، أى عند الزاوية خمسة وأربعين، فإن محور الدوران يبدو منحنيا بزاوية خمس وأربعين درجة فوق خط الأفق. والنجوم الموجودة على مستوى أقل من خمس وأربعين درجة من القطب، تبقى مرئية طوال الليل خلال دورتها الظاهرية حول ذلك المحور وهى نجوم القطب. أما النجوم المرئية حتى خمس وأربعين درجة من القطب المقابل، فلا يمكن رؤيتها على الإطلاق.

وتتحرك مجموعات النجوم ظاهريا بسرعة زَاوِيَّة تبلغ نحو خمس عشرة درجة فى الساعة، لكنها تشرق كل ليلة نحو أربع دقائق مبكرا، وهو الفارق اليومى الذى يعود لتطور حركة الأرض خلال دورتها حول الشمس.

ويدعى مسار الشمس أمام مجموعات النجوم دائرة البروج، حيث تتحرك الشمس كل يوم بمقدار درجة على ذلك المدار. وفى خلال عام، فهى تكمل ثلاثمائة وستين درجة. والآن، فلنفترض أن مدار الأرض حول الشمس يرسم خطا دائريا وهميا يبدأ بنقطة هى الشمس وينتهى بنقطة ثانية هى الأرض. ذلك الخط يقابل اثنتى عشرة كوكبة تدعى البروج، وقد ربطها القدماء بمصير الإنسان وطالعه فيما يعرف بأنه "علم" يدعى التنجيم. وبسبب ميل محور دوران الأرض عن المستوى الرأسى، يتغير وضع دائرة البروج عبر العام. وكل الكواكب بما فى ذلك القمر تتحرك فى مدار لا يبتعد عن دائرة البروج بأكثر من ثمانى درجات. أما عن علاقة ذلك بالمصير البشرى، فهو أمر محل كثير من الجدل! جدير بالذكر أن الكوكبات أو الصور النجمية التى يسهل تمييزها فى سماء الليل لا تعبر عن مواقع حقيقية للنجوم فى الكون. فنجمان متقاربان للغاية قد يكونان على فارق شاسع، وتقاربهما ليس واقعا فيزيائيا وإنما نتاج رؤيتهما من منظور الأرض. فلنتخيل نجمًا شديد اللمعان لكنه بعيد تماما، ونجمًا خافتًا

قريبًا من الشمس. حينذاك، قد يبدو النجمان شديدى التقارب والتشابه فى اللمعان الظاهرى.

لم يكن هنالك سوى خمسة كواكب معروفة منها هى كما سبق أن ذكرنا عطارد والزهرة والمريخ والمشترى وزحل، ولم تكن الأرض معترفا بها ككوكب مثلها. ولقد كشفت الرؤية الأحدث عن حقائق مختلفة تماما؛ فكل كواكب المجموعة الشمسية تدور حول الشمس. والفترة التى تتم فيها تلك الحركة أى فترة إتمام دورة كاملة هى التى تحدد العام. وتضاف لحركة دوران الكواكب حول الشمس حركة دوران كل كوكب حول نفسه. وتحدد فترة تلك الدورة الذاتية امتداد اليوم على كل كوكب. وبالنسبة لنا، فإن الحركة الظاهرية الرئيسة للأجرام السماوية فى السماء تعود لدوران الأرض حول نفسها، ذلك الدوران الذى يتم فى أربعٍ وعشرين ساعة والذى يمنحنا الانطباع بأن الشمس تدور حول الأرض أثناء النهار، وأن القبة المرصعة بالنجوم تكون فى حالة دوران أثناء الليل.

كل التصورات للعالم التى تخيلتها تلك الحضارات كانت محصورة فى توصيف المظاهر، ولم تكن تبحث فى اكتشاف قانون عميق أو فى تقديم تفسير عقلانى للعالم. ولم تظهر الرغبة فى تجاوز المظاهر والبحث عن نظام فى الكون إلا فى الألفية الأولى فى اليونان. بالجمع بين خمسٍ وخمسين كرة، توصل أرسطو نسبيا لتفسير الحركات الظاهرية للكواكب. غير أنه كان هناك عيب كبير فى أطروحته: فهو لم يكن قادرا على تفسير تغيرات الإضاءة الظاهرية للكواكب. نحن نعلم اليوم أن تباين اللمعان يعود إلى تغير المسافة بين الأرض وكل كوكب. لكن فى نظام أرسطو، كانت الكواكب موجودة على مسافة ثابتة من الأرض، ومن ثَمَّ ظلت تغيرات إضاءة الأجرام المختلفة بلا تفسير. جدير بالملاحظة هنا أن النموذج الأرسطى لوصف العالم كان يقوم على ركيزتين: الأولى هى تمركز الأرض فى قلب الكون، ومفهوم خاطئ آخر ظل سائدا لنحو ألفَىْ عام هو التمييز بين الأرض والسماء. حيث كان المفهوم السائد أنه داخل المدار القمرى، وهو ما يتضمن الأرض وغلافها الجوى، السمة

الموجودة هى الحركة والتغير. أما ما وراء القمر، فتوجد مملكة التمام وانعدام الحركة.

وفى محاولة للتغلب على الخطأ الأساسى فى نظام أرسطو وهو عدم قدرته على تفسير تغيرات لمعان الكواكب، قام فلكى من الإسكندرية يدعى كلود بطليموس بتغيير ذلك النظام فى القرن الثانى لكن دون أن يشكِّك فى المبادئ التى وضعها أفلاطون وأرسطو. فبالنسبة لبطليموس، لم تكن الأجرام السماوية مرتبطة بكرات بللورية متمركزة حول الأرض، ولكن كل كوكب يتحرك فى دائرة صغيرة تدعى فلك التدوير ومركزها نفسه يتحرك فى دائرة كبيرة حول الأرض تدعى الدائرة المتصلة. وبتقدير حجم ووضع كل الدوائر المعنية توصل بطليموس إلى نظام قادر على إعادة توصيف الحركات الظاهرية للأجرام السماوية بدقة. لقد كان بمقدوره تفسير تغيرات بريق الكواكب بما أن تلك الأخيرة تتغير مسافة بعدها عن الأرض. ذلك النجاح المزدوج يفسر كيف أن نظام بطليموس، الذى حسَّن نظام أرسطو فى شكله وليس فى جوهره، تم قبوله حتى القرن السادس عشر. نهاية، ورغم استمرار هيمنة أرسطو وبطليموس، فإن عددا من الفلاسفة اليونانيين اقترح نظاما أقرب للحقيقة. حيث طُرحت فكرة أن الأرض ليست ثابتة لكن تدور فى الواقع حول نفسها. الأمر الذى يفسر الدوران الظاهر للقبة السماوية فى أربع وعشرين ساعة. وكان ذلك التفسير هو الأدق لكنه مع ذلك لم يلقَ القبول. ولتفسير الحركة الخاصة لكوكبَى عطارد والزهرة اللذين يبدوان متأرجحين حول الشمس، فقد ظهرت فكرة أن هذين الكوكبين لا يدوران حول الأرض لكن حول الشمس. مع استمرار الاعتقاد بأن سائر الأجرام السماوية، بما فى ذلك الشمس، تدور حول الأرض. وذهب أريستارخوس الساموسى لأبعد من ذلك فى القرن الثالث؛ حيث نجح فى تقدير البعد النسبى للقمر والشمس. وأوضح كذلك أن الشمس أكبر كثيرا من الأرض؛ وبالتالى لم يكن مقتنعا بدوران جسم هائل حول جسم أصغر كثيرا. ولذلك رفض أريستارخوس نظام أرسطو وطرح نظاما بديلا، مؤداه أن الشمس هى المركز الحقيقى للعالم والكواكب كلها عدا القمر تدور حول ذلك المركز. تلك الرؤية

الصحيحة للمجموعة الشمسية تم رفضها مع ذلك لصالح رؤية أرسطو، وخسر العلم بذلك نحو ألفَىْ سنة.

وظلت مركزية الأرض التى كان أرسطو وبطليموس أهم المدافعين عنها حتى القرن السادس عشر؛ حيث حلت نظرية مركزية الشمس التى تضع الشمس فى مركز الكون والمجموعة الشمسية. ووفقا لعمليات الرصد الحديثة فهى حتى ليست فى مركز المجموعة الشمسية، وإنما هى نقطة ثابتة ـ نسبيا ـ تتمركز حولها أجرام النظام الشمسى. تلك الرؤية لم يتم العمل بها بشكل فعلى إلا على يد كوبرنيكوس فى نهاية القرن السادس عشر وبداية القرن السابع عشر، ثم يأتى جاليليو ليبدأ عهد الرصد الفلكى بأدوات للرصد وطرح أوَّلى لمبادئ ميكانيكية تؤكد على مركزية الشمس، ثم جوهان كبلر الذى أكد على نفس الرؤية مع طرح فكرة المدارات البيضويَّة للكواكب ـ تحتل الشمس إحدى بؤرتيها. ثم يأتى نيوتن ليحدد قوانين الميكانيكا السماوية ويضع نظريته عن الجاذبية، وهى المعمول بها حتى اليوم، والتى أكدتها عمليات الرصد من بداية القرن الثامن عشر. وتطرح نظرية كوبرنيكوس أن الشمس موجودة فى مركز الكون وليس الأرض، وأن كل الأجرام تدور حولها فى دوائر وأن الأرض هى فقط مركز نظام الأرض/ القمر. وقد قوبل كوبرنيكوس بالرفض من الكنيسة التى كانت تتبنى أفكار أرسطو ومن الأوساط العلمية نفسها فى ذلك الحين. وفى كتابه "فى ثورات الأجرام السماوية"، قدم كوبرنيكوس رؤية متكاملة تمثل بداية العلم الحديث، ويبعث على الدهشة بعد القرن العشرين أنها تطرح نفسها مع كل اكتشاف جديد. لقد كان نيكولا كوبرنيكوس أحد أعظم علماء عصره، كان راهبًا وعالمًا بالرياضيات وفلكيًا ورجلَ قانونٍ وطبيبًا؛ حيث لم تكن العلوم قد تبلورت بشكلٍ كافٍ لتستقل وتنفصل. ولد فى بلدة تورون على حدود بروسيا فى ١٩ فبراير عام ١٤٧٣، ونشأ فى بيت تسوده الرفاهية وفى جو مفعم بالوطنية. كان والده تاجرا ناجحا، إلا أنه فقده وهو فى العاشرة من عمره، لكن الأب ترك ما يكفى لأن تعيش العائلة حياة كريمة. كان كوبرنيكوس متعدد المواهب، ذا ولع خاص باللغتين اليونانية واللاتينية، ودرس الآداب والطب. ثم

توجه إلى روما وهناك اكتسب مقامه، بمستوى رياضى وفلكى، ولم تمضِ فترة وجيزة حتى أصبح معروفا إلى درجة أنه حصل على درجة الأستاذية فى الرياضيات فى جامعة روما. منذ البداية، كان اهتمام كوبرنيكوس منصبًّا على حركة الكواكب السابحة فى الفضاء. وكانت نظرية كوبرنيكوس بمثابة ثورة علمية حقيقية لكنها كانت ثورة نظرية لا يدعمها الرصد، وبقيت هذه النظرية موضع شك إلى أن وجَّه جاليليو منظاره نحو السماء، فأثبت بذلك النظرية الكوبرنيقية بصورة قاطعة.

قام كوبرنيكوس فى سنة ١٥١٠ بوضع الشكل العام لنظريته فى كتاب يحمل عنوان "التعليق الصغير" والذى لم ينشر بشكل رسمى. ثم تبلورت نظريته بالكامل بعد قيامه بعدة أبحاث فلكية على مدى خمسة عشر عاما. كان كتابه الأساسى "عن دوران (أو ثورات) الأجرام السماوية" المنشور فى عام ١٥٤٣، عبارة عن محاضرة له عن نظرية الفلك والخاصة بدوران الأرض وكواكب أخرى حول الشمس. ولم يكن كوبرنيكوس ميالا لنشر نظريته الجديدة التى كانت تشكِّك فى الأفكار السائدة عن نشأة الكون. وكان رد فعل الكنيسة الكاثوليكية أنها وضعت هذا الكتاب فى قائمة الكتب المحرمة، وعلى العكس من ذلك قام مفكرو البروتستانت بقبول نظريته. وبجانب الوسط الدينى، كان الوسط العلمى أيضا يسوده الارتباك، فبعض من العلماء المعاصرين لكوبرنيكوس رحبوا بحساباته الرياضية التى شملتها نظريته، لكن معظمهم رفضوا النظرية. عاصر كوبرنيكوس علماء وفنانين ساهموا، كُلٌّ فى مجاله، فى التنوير الأوروبى، فقد عاصر مايكل أنجلو وليوناردو دافنشى وكولومبس وماجلان. ولقد ضم أول أعمال كوبرنيكوس "التعليق الصغير" بعض النظريات العامة الخاصة بنظرية مركزية الشمس، ولم يكن بعد فى هذا الوقتَ متأكدا من صحة نظريته، خاصة أن العلماء الذين أرسل لهم نسخا من عمله تقبلوا ذلك بتحفظ، وهو ما يرجع إلى تأثير العهد القديم على تفكيرهم. ولكنه مع ذلك تلقى ردود أفعال إيجابية من عدد منهم. فى هذا العمل، قدم كوبرنيكوس سبع فرضيات؛ الفرضية الأولى، لا توجد نقطة مركزية لكل الأفلاك السماوية فى الكون. الفرضية الثانية

هى أن الأرض ليست مركزا للكون، بل هى مركز الثقل وفلك القمر. الفرضية الثالثة أن كل الكواكب تدور حول الشمس ولهذا بالقرب من الشمس يقع مركز الكون. الفرضية الرابعة أن نسبة تباعد الشمس عن الأرض أقل من نسبة نصف قطر فلك الأرض إلى بعدها عن الشمس. الفرضية الخامسة هى أن الحركة الظاهرية فى المجال الفلكى سببها حركة الأرض وليس حركة الشمس الذاتية. فالأرض بكل ما عليها تدور حول نفسها فى خلال أربعٍ وعشرين ساعة دورة كاملة، وحركة الشمس الملاحظة ليست حركة ذاتية لها ولكنها ناتجة عن حركة الأرض فى فلكها والتى تدور حول الشمس مثل أى كوكب آخر. الفرضية السابعة أن ما يُشاهد فى حركة الكواكب سواء إلى الأمام أو الخلف ليس ناتجا عن الكواكب بل ناتج عن حركة الأرض، ولتوضيح ما يجرى فى السماء يكفينا أن نعرف الحركة التى تقوم بها الأرض.

على الرغم من عِظَم الضربة الكبرى التى وجهها كوبرنيكوس للنفس البشرية بإزاحة كوكب الأرض من وضعه المميز كمركز للعالم، فإن ذلك لم يكن كافيا دون تأكيد من بقية علماء تلك الفترة.

لقد جاء ثلاثة علماء بعد ذلك ليدعموا تلك الرؤية وليمهدوا لبداية حقيقية لعلم الفلك الحديث، الذى بدأ انطلاقته الحقيقية مع تحديد قوانين ميكانيكا السماء وقوانين حركة الكواكب على يد إسحق نيوتن. العلماء الثلاثة الذين شكلوا نقطة الوصل بين كوبرنيكوس ونيوتن هم تايكو براه وجاليليو وكبلر. لقد كان تايكو براه يدرس القانون، لكن بعض الظواهر الطبيعية حولته عن دراساته القانونية إلى علم الفلك، وكان أول هذه الأحداث هو الكسوف الكلى للشمس الذى تنبأ الفلكيون بحدوثه فى شهر أغسطس عام ١٥٦٠. أما الحدث المهم الثانى فى حياة براه فكان عام ١٥٦٣ حين قام بإجراء أول رصد مسجل له عند اقتران كوكبَى المشترِى وزحل. وكرس ما تبقى من حياته لتجميع أكبر قدر ممكن من الأرصاد الفلكية بهدف تصحيح الجداول الفلكية المتوافرة فى زمانه، وذلك بعد أن قام بجولة فى أوروبا، اشترى فيها الكثير من الأدوات الفلكية، حيث كان الراصد الأكثر براعة بكل المستويات. وجرى فى المرصد الخاص به

رصد أهم حدث فلكي في حياته، فقد تألق فجأة نجم جديد في كوكبة ذات الكرسي وكان تألقه أشد من تألق كوكب الزهرة، وظلّ مرئيًا طَوال ستة عشر شهرًا. وقد أثار ظهور هذا النجم اهتمام براه الذي رصد بعناية تغيرات درجة تألقه، واستنتج أنه أحد نجوم كرة النجوم الثابتة. وفي تلك الأيام، كان معظم الفلكيين يؤمنون بوجهة نظر أرسطو الذي كان يرى أن النجوم غير متغيرة في تألقها، وأن ما وراء مدار القمر هو عالم التمام وعدم التغير. فقد أثبت براه بهذا الشكل أن تلك الفكرة غير صحيحة، على الرغم من تبنِّيه نموذج مركزية الأرض. فظهور نجم جديد، في تلك المنطقة من السماء، كان يشكك في هذه النظرة القائلة بأن السماء هي موطن الكمال. وإذ فقد براه إيمانه بالنظريات القديمة للنظام الكوني، فقد قرر، مثل كوبرنيكوس، أن يصمم نموذجا للعالم خاصا به. وبما أنه لم يكن يؤمن بحركة الأرض، فقد كان يدافع عن نظام تدور فيه كل الكواكب السيارة حول الشمس التي افترض دورانها حول الأرض. وقد ترك إرثًا من منجزاته الرصدية الثمينة لجوهان كبلر تلميذه ومساعده في أعوامه الأخيرة. وبالاستعانة بهذه المعلومات، مهد كبلر السبيل للأعمال الخالدة التي أنجزها فيما بعد إسحق نيوتن. كان جوهان كبلر مساعدا لتايكو براه يعمل معه في مرصده، وبذلك ورث جميع الإنجازات الرصدية لتايكو براه، فعكف على دراسة مسار كوكب المريخ محاولاً وضع نموذج هندسي لحركة هذا الكوكب حول الشمس. واكتشف أن المسار الإهليجي (وليس الدائري) يتواءم ونتائج الرصد بدقة كبيرة، بحيث تقع الشمس في إحدى بؤرتَي الإهليج. وبرع كبلر في الرياضيات بشكل كبير. وكانت قوانينه هي التي هدت العالم الإنجليزي إسحق نيوتن إلى اكتشاف أول قانون للجاذبية الكونية، حيث بينت قوانين كبلر أن هناك قوة جاذبية بين الكواكب. كما استطاع كبلر تعميم هذا الاستنتاج على مسارات الكواكب السيارة الأخرى بما في ذلك الأرض، فاتضحت الصورة عنده. لذلك وضع كبلر قانونه الأول الذي يقرر بأن كل كوكب يدور في مدار إهليجي حول الشمس، وتقع الشمس في إحدى بؤرتيه. ثم راجع كبلر دراسة سرعة الكواكب في مداراتها فوجد أن سرعتها تتغير من موقع إلى آخر بحسب بعدها أو قربها من البؤرة التي تقع فيها الشمس، لكنه اكتشف أن الخط الواصل بين

الكوكب والشمس يمسح مساحات متساوية فى أزمنة متساوية، وهذا يعنى أن سرعة الكواكب تزداد كلما اقتربت من الشمس. وسُمى هذا قانون كبلر الثانى. ثم قام كبلر بحساب أقطار هذه المدارات. ولما كانت أشكالها الصحيحة إهليجية وليست دائرية، يكون لها قطران مختلفان، ومركز الإهليج هو النقطة التى تقع عند تقاطع المحورين. ويتناسب مربع زمن دورة الكوكب حول الشمس تناسبا طرديا مع مكعب نصف القطر الكبير. وسمى هذا الاكتشاف قانون كبلر الثالث. وصفت هذه القوانين الثلاثة المتكاملة حركة الكواكب حول الشمس وفق المنظور الجديد القائل بمركزية الشمس، بشكل أصبحت فيه الحسابات تطابق الأرصاد الفلكية إلى درجة كبيرة، فى الوقت ذاته الذى فسرت فيه الحركات التراجعية للكواكب دون الحاجة إلى وجود أفلاك التدوير. كان كبلر يرى أن النظام الذى وضعه كوبرنيكوس عن مركزية الشمس هو الوحيد الذى يعكس الحقيقة بدقة. وبدأ جاليليو، فى عام ١٦٠٩، فى صناعة المِرْقَب الأول فى تاريخ البشرية بوضع عدستين فى طرفَىْ أنبوب من الرصاص. بعد ذلك، انكب جاليليو على منظاره يحسن من صناعته، وراح يبيع ما ينتج منه بيديه، وصنع المئات وأرسلها إلى مختلف بلاد أوروبا. فى تلك الأيام، كان كل فرد يعتقد أن الأرض هى مركز الكون وأن الشمس وباقى الكواكب تدور حولها، وكان درب التبانة يُعدُّ حزمة من الضوء تمرق عبر السماء، وأن القمر مسطح الشكل. ولكن عندما نظر جاليليو من خلال عدسات منظاره لم يجد شيئا من هذا كله صحيحا. فقد رأى أن فى القمر مرتفعات، وأن كوكب المشترى له أقمار، مثلها مثل القمر الذى يدور حول الأرض، ورأى أن الطريق اللبنى ليس مجرد سحابة من الضوء إنما هو يتكون من عدد لا حصر له من النجوم. وكتب جاليليو كتابا تحدث فيه عن ملاحظاته ونظرياته، وقال إنها تثبت أن الأرض كوكب صغير يدور حول الشمس مع غيره من الكواكب، وكتب بعد ذلك فى كتاب آخر بعد ستة عشر عامًا نفس الأفكار، وأضاف أنها لا تتعارض مع شىء مما فى الكتاب المقدس. وفى هذه المرة أرغمته الكنيسة على أن يقرر علانية أن الأرض لا تتحرك على الإطلاق وأنها ثابتة كما يقول علماء عصره. ظل جاليليو حبيسا فى منزله حتى وافته المنيَّة فى ٨ يونيه ١٦٤٢، وتم دفن جثمانه

فى فلورنسا. كان كل ذلك تمهيدا لحدوث ثورة فى علم الفلك قادها السير إسحق نيوتن عن طريق وضع أول تصور تاريخى لقوانين حركة الأجرام السماوية وطبيعة قوة الجاذبية. ولد نيوتن فى عام ١٦٤٣ وتُوفِّى فى ١٧٢٧ وكان فيزيائيا إنجليزيا من الطراز الأول وعالم رياضيات وفلك وفيلسوفًا وكيميائيًا، وواحدًا من أعظم الرجال تأثيرًا فى تاريخ البشرية. ويعد كتابه الأصول الرياضية للفلسفة الطبيعية، والذى نشر عام ١٦٨٧، من أكثر الكتب تأثيرًا فى تاريخ العلم، حيث حدد أسس معظم نظريات ميكانيكا السماء الكلاسيكية. وصف نيوتن الجاذبية والحركة وقوانينها التى سيطرت على النظرة العلمية للفلك على مدى القرون الثلاثة التالية. ثم جاء أينشتاين فى بداية القرن العشرين ليُدْخل بُعْد الزمان على نظريات نيوتن ويفتح كل احتمالات الخيال، ولينشأ علم الكونيات الحديث (الكوزمولوجى) مع نشأة الفيزياء الفلكية والتحليل الطيفى لطيف الأجرام السماوية.

وهاهو شبح كوبرنيكوس يظهر ثانية! ماذا حدث فى القرن العشرين منذ عام ١٩٠٠؟ على مدى مائة عام عرفنا ما لم نعرفه طوال ألف عام؛ فلنحدد بدقة: الأرض ليست فى مركز المنظومة الشمسية فذلك الموضع المركزى تحتله الشمس. والشمس ليست فى مركز المجرة لكن عند حافتها، فدرب التبانة، ذلك الشريط الضوئى الذى يمرق عبر سماء الليل، كان من المعتقد حتى وقت ليس ببعيد أنه يشكل كل الكون. لكن نبوءة إيمانويل كانط العبقرية، الذى افترض فيها أن تلك السُّدُم الضبابية هى مجرات كاملة ومدن نجمية تحوى ملايين النجوم على غرار درب التبانة، بيَّنت أن المجرة ليست فى مركز الكون لأن الكون ليس له مركز ولا حافة، ويبدو عامرا بملايين التكوينات المَجَرِّية.

بعد ذلك يجىء دور الشمس، حيث اتضح فى بداية القرن العشرين أنها لا تقع فى مركز المجرة وأن موضعها الحقيقى قرب الأطراف، ثم تبين كذلك أن المجرة لا تحتفظ بأى موقع مميز فى الكون، بل إن الكون ذاته ليس له مركز ولا حافة. والآن، ومع بداية القرن الحادى والعشرين، جاء اكتشافان ليضعا كوبرنيكوس ثانية على القمة. تلك العودة للمبدأ الكوبرنيقى، مبدأ استبعادنا من

مركز الكون، جاءت على مستويين. الأول بدأ منذ منتصف القرن المنصرم أو حتى منذ أوائله حيث تأتينا المادة السوداء والطاقة السوداء، لتزيدنا انفصالا عن الكون الشاسع. إن تلك الثورة الكوبرنيقية والتى أقصت الإنسان عن كيان الكون، قد تكون هى الصفعة الأكثر عنفا التى تلقتها البشرية. ما الذى يعنيه ذلك؟ نحو ٩٥% من مادة الكون يتشكل من مادة غير ذرية مجهولة تماما وليس هناك سوى افتراضات واهية للغاية عن ماهيتها. بدأ اكتشاف هذه المعلومات منذ نحو منتصف القرن العشرين، بمعاونة قوانين نيوتن التى تصف مسارات الأجرام السماوية. تلك القوانين تسمح، عبر بعض الحسابات، بربط سرعة الأجسام بالكتلة التى تجذبها. النجوم الموجودة على أطراف مجرة المرأة المسلسلة تدور بسرعة شديدة فى الواقع. وينبعث الجزء الأساسى من الضوء بشدة بالقرب من المركز ـ والحواف تصير بسرعة كبيرة معتمة ـ ومن ثَمَّ نستنتج أن الجزء الأساسى من الكتلة موجود بالقرب من المركز. إذن كلما ابتعدنا عنه، قلت قوة الجاذبية التى تزيد من سرعة النجوم. إنه الحال على سبيل المثال بالنسبة لكواكب المجموعة الشمسية: فالكواكب الأقرب من الشمس، مثل عطارد، أو الزهرة أو الأرض تدور بسرعة كبيرة، فى حين أن الكواكب الأكثر بعدا مثل نبتون وأورانوس أو بلوتو تكون لها حركة أكثر بطئا بكثير. بيد أن أيًا من هذا لم يحدث على الإطلاق بالنسبة لمجرة أندروميدا ولا بالنسبة للمجرات الحلزونية الأخرى التى تم رصدها، والسرعات تبقى عمليا مستقرة مهما نبتعد من المركز. أى أن النجوم الأكثر بعدا تبقى على سرعة كبيرة رغم الجاذبية القليلة التى تتعرض لها من جانب النجوم المرئية. منذ ذلك الحين، كثير من الفيزيائيين الفلكيين يصلون لخلاصة مفادها: أن المجرات الحلزونية تبدو جليا محاطة بهالة عملاقة من مادة غير مرئية. وتلك المادة كبيرة للغاية بحيث قد تصل إلى نحو ٩٠% من الكتلة الكلية للمجرة. لقد انتهى الجدال حول موضوع "الكتلة الناقصة"، بعد سنوات من الجدل واللبس، بأن يفرض نفسه كموضوع رئيس. ولم يكن شيئا مستحدثا استخدام قوانين الحركة للتوصل إلى وجود كتلة مختفية. فمنذ عام ١٨٤٤، تم الربط بين الارتباك فى حركة نجم الشعرى

اليمانية سايروس إلى وجود صديق معتم - متقزم أبيض - تم رصده بعد ثمانية عشر عاما بعد ذلك. لكن المثال الأكثر شهرة يبقى اكتشاف كوكب نبتون فى الثالث والعشرين من سبتمبر عام ١٨٤٦، لدى دراسة عدم الانتظام فى مسار كوكب آخر هو أورانوس. لم يكن ثمة كثير من الاختيارات: فإما إن قوانين نيوتن التى ترتكز عليها كل الميكانيكا السماوية خطأ أو أن جسما ثقيلا - ربما كان كوكبا مجهولا - يربك مسار أورانوس ويجذبه إليه. وكانت تلك الأطروحة الثانية تقتضى البحث عن ذلك الكوكب الجديد، وطرح بعد ذلك بأربع سنوات، مدارا افتراضيا. بنفس هذا المنهج تم الكشف النظرى عن المادة القاتمة بالكون. بعض العلماء يمدون تلك الرؤية إلى حد افتراض وجود أكثر من كون يسبح داخل الأثير الأسود القاتم؛ وبالتالى أكثر من بداية ومن انفجار عظيم. لكن ليس من الممكن فى الأحوال كافة الحصول على معارف تجريبية بشأن ذلك.

الاستبعاد الثانى العلمى من مركز الكون بدأ منذ رصد كواكب غازية على غرار المشترى ورصد أشباه كواكب غازية تعمر نهر السماء، بعد الكشف عن الكوكب غير الشمسى الأقرب منا، بكتلة أقل قليلا من كتلة المشترى. ومنذ منتصف التسعينيات، تم اكتشاف وتصنيف العشرات من مثل هذه الكواكب. كان الاكتشاف قد جاء من قِبل فريق فرنسى سويسرى، عن طريق التحليل الطيفى، حيث أوضح ميشيل مايور وديدييه كيلوز وجود كوكب رفيق يدور حول النجم ٥١ بكوكبة البيجاز الفرس الأعظم؛ وذلك عن طريق دراسة التفاعل الجذبوى المتبادل بين الجرمين النجم والكوكب. ويتضح من ذلك أنه مهما صغر حجم الكوكب فإن من شأنه أن يغير - وإن قليلا - من مسار النجم الذى يدور حوله. وأقل خلل يمكنه أن يكشف عن وجود كوكب. ويدلل على ذلك ظهور كوكب بكتلة تقارب نصف كتلة المشترى، أى أكثر من مائة مرة مثل كتلة كوكب الأرض؛ وفتح طريقا حقيقيا إلى الكواكب الخارجية. فبعد مرور أكثر من عشرة أعوام، تم رصد أكثر من مائة من الكواكب الخارجية.

أوليڤييه إسلانجيه، مؤلف هذا الكتاب، هو فيزيائى فلكى فرنسى من مواليد عام ١٩٧٠ ويقدم هذه الدراسة تحت اسم "مقدمة فى علم الفلك"، حيث يطرح

بشكل أفقى كل قضايا علم الفلك الحديث وعلم الكونيات، بلغة بسيطة للجمهور المتوسط، مع درجة لا بأس بها من العمق. هذا النص، الذى وردت عليه آخر التحديثات على الموقع الإلكترونى للكاتب فى عام ٢٠١٢، يبدأ بمقدمات تاريخية لنشأة علم الفلك والرصد الفلكى ثم ينتقل لتحليل كواكب المجموعة الشمسية، وينتقل بشكل ممنهج للنجوم فالمجرات والتكوينات الأكبر بالكون. فى نهاية تلك المقدمة، تبدأ الرحلة الطويلة، ويبقى القارئ المتوسط غير المتخصص هو الحَكَم النهائى على النص وهو غايتى الأولى والأخيرة من كل رحلة.

طارق كامل

[١]

نشأة علم الفلك

الحركة الظاهرية للكواكب

خلال الجزء الأكبر من تاريخ علم الفلك، من الحضارات القديمة وحتى القرن التاسع عشر، كان علماء الفلك مقتصرين على دراسة الحركة الظاهرية للكواكب فى السماء. وقبل تناول تاريخ علم الفلك، من المفيد إذن أن نذكر سريعا بعض المفاهيم حول الحركة التى تدير أجرام المجموعة الشمسية بهدف فهم المشكلات التى على علماء الفلك مواجهتها.

يهيمن على مجموعتنا الشمسية من كل الجوانب نجم هو الشمس، ويمكن اعتباره، من أجل التبسيط، مثل مركزها. ذلك النجم محاط بموكب من ثمانية كواكب كبيرة: عطارد والزهرة والأرض والمِرِّيخ والمُشتَرِى وزحل وأورانوس ونبتون. وفى الحقب التاريخية التى سوف نتناولها هنا، لم يكن هنالك سوى خمسة كواكب معروفة منها؛ هى عطارد والزهرة والمريخ والمشترى وزحل، ولم تكن الأرض ضمن قائمة الكواكب المعترف بها.

وتدور كل الكواكب حول الشمس. وفى حالة الأرض، فإن الفترة التى تتم فيها تلك الحركة، أى فترة إتمام دورة كاملة، هى التى تحدد مدة العام. وتضاف لحركة دوران الكواكب حول الشمس حركة دوران كل كوكب حول نفسه. وتحدد

فترة تلك الدورة امتداد اليوم على كل كوكب. وبالنسبة للأرض، فإن الحركة الظاهرية الرئيسة للأجرام السماوية فى السماء تعود لدوران الأرض حول نفسها. إن ذلك الدوران الذى يتم فى أربع وعشرين ساعة هو الذى يمنحنا الانطباع بأن الشمس تدور حول الأرض أثناء النهار، وأن القبة المرصعة بالنجوم تكون فى حالة دوران أثناء الليل.

الحركة الظاهرية

ولو افترضنا توقف حركة دوران الأرض حول نفسها؛ فى تلك الحالة، فإن دورة الكواكب حول الشمس هى التى ستؤدى لتغييرات ظاهرة فى مواقع تلك الكواكب. فى الواقع، لو أن الكواكب تتحرك بالنسبة للشمس، فإن موضعها فى سمائنا سوف يتغير بشكل طفيف مع مرور الزمن؛ حيث يحدث انحراف قابل للرصد بفضل الخلفية الثابتة التى تشكلها النجوم. بهذا الشكل، يتغير على سبيل المثال الوضع الظاهرى لكوكب المريخ بالنسبة لخلفية النجوم شيئا فشيئا، ويبدو كما لو كان ينتقل بشكل طفيف نحو الشرق. ولنلحظ أن النجوم تبدو ثابتة لأنها موجودة على مسافات هائلة وحركتها الافتراضية غير قابلة للاكتشاف. وتبدو حالة الزهرة وعطارد هى الأخرى معقدة بسبب حقيقة أن مدارَىْ هذين الكوكبين يقعان قبل مدار الأرض. فالجرمان لا يمكن رصدهما فى أى اتجاه بالسماء وإنما يبقيان محصورين باتجاه الشمس، ويبدوان متأرجحين ببطء حولها.

الحركة التراجعية

ويبدو الوضع العام أيضا معقدا بسبب واقع أن الأرض تدور حول الشمس. حيث يؤدى ذلك الدوران لظاهرة تدعى الحركة التراجعية للكواكب. ولكى نفهم تلك الحركة فلنقم بتلك التجربة. ارفع إحدى أصابعك أمام وجهك، وقم بتحريكها ببطء تجاه اليسار ثم أدر رأسك سريعا فى نفس الاتجاه، وبتأثير المنظور ستبدو لك إصبعك كأنها هى التى تحركت جهة اليمين.

بدايات علم الفلك

كان الإنسان يقوم بالفعل برصد السماء منذ عشرات الآلاف من الأعوام. وكانت ظواهر مثل حركة الشمس فى السماء أو تغيرات أوجه القمر معتادة بالنسبة إليه. وشيئا فشيئا، بدأ فى استخدام تلك الظواهر لصالحه.

كانت حركة الشمس فى السماء، من الشرق فى الفجر حتى الغرب فى الغسق، تفيد فى قياس الزمن على مر اليوم. وبالنسبة لدورة أطوار القمر، فقد كانت تسمح بتحديد تقويم قمرى يستخدم لتحديد تاريخ الأعياد الدينية.

وثمة ظاهرة أخرى أكثر بطئا اتضح أنها ذات فائدة كبيرة، وتتمثل فى أن شكل السماء فى الليل ليس ثابتا على امتداد السنة. فبعض النجوم لا يمكن رؤيتها إلا فى فصل الصيف، وأخرى يمكن رؤيتها فى فصل الشتاء فقط. وفضلا عن ذلك، لو أننا قمنا برصد الموضع الظاهرى لشروق الشمس بالنسبة للنجوم لاتضح أن ذلك الموضع ليس ثابتا، وإنما ينحرف ببطء من يوم لآخر. غير أن القدماء فهموا أن تلك الحركة، الناجمة عن دوران الأرض حول الشمس، مرتبطة بدورة الفصول. لأنه بعد دورة كاملة، كان شروق الشمس يستعيد نفس الموضع بالنسبة للنجوم. وبذلك أتاحت تلك الظاهرة تحديد تقويم مفيد إلى أقصى حد للزراعة؛ حيث أمكن تحديد الفترة المناسبة للزرع أو الحصاد.

كان إذن علم الفلك فى بداياته بالأساس أداة لقياس الزمن. غير أن ذلك العلم تطور على الأرجح بشكل متسارع نتيجة المشكلة التالية: لاحظ الفلكيون الأوائل أن فترات الزمن الأساسية اليوم والشهر اللذين تحددهما دورة القمر، والسنة ليست متسقة بعضها مع البعض. وبشكل خاص، فإن السنة لا تتناسب مع عدد صحيح محدد من الشهور ولا مع عدد صحيح محدد من الأيام. وبالتالى كان تحديد تقويم سليم يتطلب رصدا شديد الدقة للسماء. وتطور بهذا الشكل رصد الأجرام فى السماء، وبلغ مستوًى رفيعا للغاية مثلما تشهد كتابات الحضارات الكبرى بالألفيتين الخامسة والثانية قبل الميلاد، وبوجه خاص فى العهد الحجرى وفى مصر وفى الصين. فى تلك الحقبة، على وجه التحديد ومن

منطلق السعى إلى تحديد المواقع بشكل أسهل فى القبة السماوية، قام الفلكيون بتجميع بعض النجوم بشكل عشوائى تماما لتكوين صور يسهل التعرف عليها وهى الكوكبات.

وبالإضافة للتعرف على حركة الأجرام، وضع القدماء توصيفات للعالم وتفسيرات لأصله. كل تلك النظريات كانت مبنية على فكرة مشتركة، وهى أن وضع الأرض فى مركز الكون. بالنسبة للبابليين، على سبيل المثال، فإننا موجودون فى قلب قبة صلبة هائلة محاطة بالمياه. وثمة ثقوب فى تلك القبة تسمح للماء بالتسرب والإمطار. وفى مصر، كانت السماء هى جسد الإلهة نوت والأرض جسد الإله جِبْ. وبالنسبة للنجوم فهى نيران تركت الأرض وارتفعت إلى السماء.

توصيفات العالم

وكان ثمة فكر مشترك آخر بتلك التوصيفات وهو الاعتقاد فى القوة التى يمكن للأجرام السماوية ممارستها على البشر. فى الواقع، بالنسبة للقدماء، كانت الشمس والقمر والنجوم تُعد ظواهر طبيعية مثلها مثل سقوط الأمطار على سبيل المثال. ولهذا السبب، كان الاعتقاد بأن الأجرام هى الأخرى لا بد لها تأثير كبير على حياة البشر. ونشأت من هنا فكرة أن وضع الأجرام السماوية فى السماء له دلالة خفية تتعلق بمصائرنا: وكان ذلك هو مولد علم التنجيم..

كانت كل التصورات للعالم التى تخيلتها تلك الحضارات تشترك فى كونها مقصورة علي توصيف المظاهر. فتلك الحضارات لم تكن تبحث عن اكتشاف قانون عميق أو فى تقديم تفسير عقلانى للعالم. ولم يظهر الاتجاه إلى تجاوز المظاهر والبحث عن نظام فى الكون إلا فى الألفية الأولى قبل الميلاد فى اليونان. وجاءت المحاولات الأولى لتقديم تفسير عقلانى للعالم على يد الفلاسفة الإيونيين بالقرن السابع قبل الميلاد، مثل طاليس الملطى وأنكسمانس. وظهرت بهذا الشكل عدة نماذج لتوصيف العالم. ورغم أنها كانت كلها تتسم بالعشوائية؛ فقد كانت تتميز برغبة هائلة فى تفسير العالم عبر قوانين الطبيعة وليس باللجوء للسحر أو التفسيرات الدينية باعتبارها مجرد معجزات من السماء.

وكانت ثمة خطوة للأمام تحققت فى القرن السادس قبل الميلاد عبر فيثاغورث وتلاميذه بأول نظرية لحركة الأجرام السماوية تدعى تناغم الكرات. كانت تلك النظرية تُعدُّ الأرض كرة موجودة فى مركز العالم. وحولها نجد تعاقبا فى الكرات التى تحمل كل منها جرما سماويا بالترتيب؛ القمر وعطارد والزهرة والشمس والمريخ والمشترى وزحل. وفى النهاية، كان يفترض أن الكرة الأخيرة تحمل النجوم الثابتة. ولم تكن تلك الكرات ثابتة لكن فى حالة دوران. وبالنسبة للفيثاغورثيين، لم تكن الأجرام السماوية تتحرك بذاتها، لكن كانت مرهونة بدوران الكرات المتعاقبة. ودون شك، كان ذلك النموذج غير قادر على تفسير عدم الانتظام فى تحرك الكواكب، وبوجه خاص الحركة التراجعية لها.

علم الفلك فى مصر القديمة

ويبعث على الأسف أن مكتبة الإسكندرية تعرضت لدمار شامل تحت وطأة الحروب والغزوات! بحيث إن معرفتنا عن علم الفلك المصرى القديم محدودة للغاية ولا مورد لها، إلا ما ندر من مخطوطات فرعونية أو بعض النقوش على المقابر والمعابد.

ولقد كان لعلم الفلك أهمية كبيرة بالنسبة للحضارة المصرية، سواء من وجهة النظر الدينية أوِ على مستوى تنظيم الحياة اليومية ولاسيما فى قياس الزمن.

السنة الشمسية ٣٦٥ يومًا

بفعل الدورة السنوية للأرض حول الشمس، فإن الموضع الظاهرى للشمس بالنسبة للقبة السماوية يتحرك ببطء نحو الشرق على مر العام. ونتيجة ذلك هى أننا كل صباح نرى نجومًا جديدة تكون قبل ذلك متوارية فى الأفق قُبيل شروق الشمس. ويسمى ذلك الظهور الأول فى السنة الشروق الشمسى (نسبة إلى الكلمة اليونانية "هليوس" التى تعنى الشمس).

وفى عهد مصر القديمة، كان فيضان النيل يحدث كل عام قرب التاسع عشر من يوليو. وفى توافق خالص، يصادف هذا الموعد الشروق الشمسى للنجم الألمع فى السماء وهو سايروس "الشعرى اليمانية"، الذى يُسمى سوتيس عند الإغريق وسبدت فى مصر، أى أول ظهور له فى العام. وبما أن فيضان النيل كان يزيد من خصوبة الأراضى ويغذى الشعب، فإن رصد شروق سايروس، وبشكل أعم رصد السماء ليلا، قد صار عنصرا أساسيا فى الحضارة المصرية.

وباعتبار أن ركيزة قياس الزمن هى الحركة الظاهرية للشمس وليس دورات القمر، فإن المصريين ابتكروا التقويم الشمسى. وبما أن شروق سايروس كان يحدث تقريبا مرة كل ثلاثمائة وخمسة وستين يومًا وليلة، فقد قاموا بتقسيم العام لثلاثمائة وخمسة وستين يومًا. وبما أن دورة القمر تستمر لمدة نحو ثلاثين يومًا وليلة، فقد قسموا العام لاثنى عشر شهرا مقسما على ثلاثين يومًا، وكان كل شهر مقسما لثلاث فترات من عشرة أيام. وللوصول فى نهاية المطاف لإجمالى ثلاثمائة وخمسة وستين يوما، فقد أضافوا خمسة أيام جعلوها أيام الاحتفال بالآلهة أوزوريس وست وإيزيس ونفتيس وحورس.

وبما أن السنة الفلكية الحقيقية ليست بالضبط (٣٦٥) يوما، فإن التقويم المصرى كان يتزحزح ببطء بالنسبة لدورة القبة السماوية بنحو يوم كل أربعة أعوام. ولم يكن فيضان النيل ليتوافق إذن مع البداية الرسمية للسنة إلا كل ألف وأربعمائة وستين عامًا، وهو امتداد زمنى يُدعى فترة السوتياك. واستمر هذا الحال إلى أن جاء چول سيزار فى عام ٤٥ قبل الميلاد ووضع التقويم الچوليانى، بأعوامه الكبيسة، لكى يكون التقويم متوازيا بشكل صحيح مع الأجرام السماوية.

اليوم ٢٤ ساعة

لقد ابتكر المصريون أيضا تقسيم اليوم إلى أربع وعشرين ساعة. ولمزيد من الدقة فى قراءة القبة السماوية وقياس مرور الوقت، فقد قسموا السماء لمجموعات صغيرة من النجوم يمكن تمييزها بسهولة وتشرق الواحدة تلو الأخرى

على مدار الليل. وللتوافق مع وحدة الأيام العشرة، فقد تم اختيار كل مجموعة نجوم بحيث أن يكون شروقها الشمسى مفصولا عن سابقتها بعشرة أيام. من هذا المنطلق قُسِّمت السماء إلى ست وثلاثين مجموعة نجوم أُطلق عليها اسم الأبراج.

وبما أن طول فترة الليل يتعلق بالفصول، فإن عدد الأبراج التى يمكن رصدها خلال الليل يكون متباينا. لكن فى بداية الصيف، فى فترة الشروق الشمسى للشعرى اليمانية، لا يستمر الليل لأكثر من ثمانى ساعات، وفقط اثنا عشر برجا يمكن رصدها على مدار الليل. وربما بطريقة لا تخلو من العشوائية اتخذ قدماء المصريين هذا الرقم "١٢" أساسا لتقسيم الليل فى النظام الجديد، ثم انسحب ذلك أيضًا على تقسيم ساعات النهار ليصبح اليوم مقسمًا إلى ٢٤ ساعة وهو النظام المستخدم الآن.

فن العمارة

ألقى ولع المصريين بالسماء بظلاله على فن العمارة لبعض آثارهم. حيث حددوا وضع أهرام الجيزة الكبيرة، على سبيل المثال، بحيث تكون متوافقة مع الاتجاهات الأربعة بدقة مبهرة، تصل لنحو دقائق قوسية. وتجدر الإشارة إلى أن اتجاه الشمال، فى تلك الحقبة، لم يكن فى اتجاه النجم القطبى مثلما هو الوضع حاليا، لكن فى اتجاه نجم (الطوبان) فى كوكبة التنِّين.

ثمة مثال آخر معروف هو معبد أمون رع بالكرنك والذى كان جانبه متوازيا مع اتجاه شروق الشمس وقت حلول الصيف.

الأساطير

كان لدى المصريين معتقدات أسطورية شديدة الثراء ومرتبطة دوما بالظواهر السماوية. فى بعض النصوص، كان العالم لديهم عبارة عن علبة مستطيلة، جانباها الشمالى والجنوبى هما الأكثر طولا. ويعلو تلك العلبة سقف مُستوٍ مرفوع على أربع أعمدة متصلة ببعضها بسلسلة من الجبال، ينساب فى

أخدود ممتد بطولها نهر مقدس تتهادى على مياهه فى جلال مراكب تحمل القمر والشمس والكواكب.

وفى تصور آخر، كان جسد الآلهة نوت ممتدًا فوق العالم مع انفراج الذراعين والساقين بما يشكل القبة السماوية. وكانت الشمس تشرق كل صباح من اتجاه رحمها وتغرب فى نهاية اليوم داخل فمها. أما الإله جِبْ، إله الأرض، فينام أسفل "نوت" زوجته وأخته.

وكانت كل الأجرام السماوية بوجه عام مرتبطة بالألوهية. كانت الشمس تمثل العديد من الآلهة وفقا لوضعها فى السماء (خيبرى) فى الفجر، و(رع) وقت الظهيرة، و(أتون) ليلا. وكان القمر يمثل هو الآخر العديد من الآلهة؛ (أه) و(توت) و(خونسو). وكان لكوكبة الجبار أهمية شديدة الخصوصية وكانت ترتبط بأوزيريس الطفل الأول للإله (نوت) و(جب) وإله الموت والبعث. وكان موت أوزيريس وبعثه رموزا قوية لفترة الجفاف السنوى فى مصر والذى يعقب دوما فيضان النيل وخصوبة الأراضى.

علم الفلك الإغريقى

أرسطو

كان تطور علم الفلك بعد ذلك مرتبطا بأرسطو، الفيلسوف اليونانى الذى عاش بالقرن الرابع قبل الميلاد والذى هيمنت أفكاره الخاطئة على التفكير العلمى لنحو ألفَىْ سنة

ارتكز أرسطو فى نظرياته على استنتاجات أحد أسلافه وهو أفلاطون، والذى يتسم الكون وفقا له بشكل كروى، وأن حركة كل الأجرام السماوية دائرية منتظمة أى أنها تتم بسرعات ثابتة.

فى نظام أرسطو، على غرار نظام فيثاغورث، كانت الأرض ثابتة فى مركز العالم ومحاطة بكرات بللورية متعاقبة. وكانت المشكلة فى نظام فيثاغورث تكمن فى أن كل كوكب مرتبط بكرة واحدة، وهو ما لم يكن يفسر

حالات عدم الانتظام فى الحركات الظاهرية. وتغلب أرسطو على تلك المشكلة بإنشاء نظام أكثر تعقيدا يضم خمسًا وخمسين كرة متراصة فى قلب بعضها البعض. وكان كل كوكب، بهذا الشكل، مرتبطا بمجموعة من الكرات تؤثر تحركاتها على بعضها البعض. وكانت عملية الدمج بهذا الشكل بين حالات الدوران المختلفة تسمح بمنح كل كوكب حركة معقدة، يمكن تعديلها لتصبح موائمة لما نرصده فى السماء.

وبالجمع بين خمسٍ وخمسين كرة، توصل أرسطو نسبيًا لتفسير التحركات الظاهرية للكواكب. غير أن عيبًا كبيرًا كان يشوب نظامه: فهو لم يكن ينطوى على تفسير لتغيرات الإضاءة الظاهرية للكواكب. نحن نعلم اليوم أن تباين اللمعان يعود إلى اختلاف المسافة بين الأرض والكواكب، لكن فى نظام أرسطو، كانت الكواكب موجودة على مسافة ثابتة من الأرض، وظلت تغيرات الإضاءة لديه بلا تفسير.

جدير أيضا بالملاحظة، أنه بالإضافة لنظامه للعالم، فقد أدخل أرسطو مفهومًا آخر خاطئًا ظل سائدا لنحو ألفَىْ عام هو التمييز بين الأرض والسماوات. فمن جانبه، كان كل ما يوجد داخل إطار المدار القمرى، وهو ما يتضمن الأرض وغلافها الجوى، تسوده سمة عدم التمام والتغير. أما ما وراء القمر، فتوجد مملكة التمام والسكون. ولقد ظل هذا التمييز مهيمنًا على الفكر العلمى حتى القرن السادس عشر، حيث بدأت عقول أكثر انفتاحا تدرك أن ذلك التمييز ليس له أساس من الصحة.

بطليموس

كان الخطأ الأساسى فى نظام أرسطو هو العجز عن تفسير تباين لمعان الكواكب. ولهذا السبب، قام فلكى من الإسكندرية، وهو كلود بطليموس، بتغيير ذلك النظام فى القرن الثانى، لكن دون أن يشكك فى المبادئ التى وضعها أفلاطون وأرسطو. فبالنسبة لبطليموس، لم تكن الأجرام السماوية مرتبطة بكرات بللورية متمركزة حول الأرض، لكن كل كوكب كان يتحرك فى دائرة صغيرة

تدعى فلك التدوير، ويتحرك مركزها نفسه متبعا دائرة كبيرة متمركزة حول الأرض تدعى الدائرة المتصلة.

وبحساب وتغيير حجم ووضع كل الدوائر المعنية، توصل بطليموس إلى نظام قادر على إعادة توصيف الحركات الظاهرية للأجرام السماوية بدقة. لقد استطاع تفسير تباين بريق الكواكب بما أن تلك الأخيرة تتغير مسافة بعدها عن الأرض. إن ذلك النجاح المزدوج يفسر كيف تم قبول نظام بطليموس، الذى حسَّن نظام أرسطو فى شكله وليس فى جوهره، حتى القرن السادس عشر.

هراقليطس وأريستارخوس الساموسى

ولاستكمال تلك الجولة فلعلنا نشير إلى أنه رغم الوضع المهيمن لأرسطو وبطليموس، فإنه ثمة فيلسوفان يونانيان آخران قد اقترحا نظامًا أقرب للحقيقة. ففى حقبة أرسطو، طرح هراقليطس فكرة أن الأرض ليست ثابتة، لكن تدور فى الحقيقة حول نفسها، بشكل يمكِّن من تفسير الدوران الظاهرى للقبة السماوية فى أربع وعشرين ساعة بشكل طبيعى أكثر. وكان ذلك التفسير هو الأفضل، لكنه للأسف لم يلقَ القبول. وفى وقت لاحق وفى محاولة لتفسير الحركة الخاصة لكوكبى عطارد والزهرة اللذين يبدوان متأرجحين حول الشمس، طرح هراقليطس فكرة أن هذين الكوكبين لا يدوران حول الأرض لكن حول الشمس. لقد توصل هراقليطس بهذا الشكل لنظام أقرب للحقيقة مقارنة بنظام أرسطو، حتى لو كان مستمرا فى الاعتقاد بأن الباقى من الأجرام السماوية بما فى ذلك الشمس تدور حول الأرض.

أما أريستارخوس الساموسى فقد ذهب لأبعد من ذلك فى القرن الثالث. فبتطبيق حساباته الهندسية على الأجرام السماوية، لاسيما وقت خسوف القمر، استطاع ذلك الفيلسوف اليونانى تحديد المسافات النسبية لبعد القمر والشمس. وأوضح كذلك أن الشمس أكبر كثيرًا من الأرض. الأمر الذى ينمُّ عن عدم اقتناع أريستارخوس الساموسى بدوران جسم هائل حول جسم أصغر كثيرا. فقد رفض إذن نظام أرسطو وطرح نظاما بديلا، الشمس به هى المركز الحقيقى للعالم، والكواكب كلها عدا القمر تدور حول ذلك المركز. غير أنه تم أيضا

استبعاد تلك الرؤية الصحيحة للمجموعة الشمسية لصالح رؤية أرسطو وخسر العلم بذلك نحو ألفَى سنة.

علم الفلك فى أرض الإسلام

بين حقبة بطليموس وحقبة كوبرنيكوس، وهى فترة تزيد على الألف عام، لم يعرف علم الفلك تطورات مهمة فى أوروبا. وحدثت بالمقابل فى العالم الإسلامى تطورات مهمة بين القرن التاسع والقرن الحادى عشر؛ سواء فى أدوات الرياضيات المستخدمة لعلم الفلك أو على مستوى رصد السماء.

بدأ ذلك العصر الذهبى لعلم الفلك الإسلامي إبان حكم الخليفة الرشيد ثم ابنه الخليفة المأمون، حيث اهتم كلاهما بدفع العمل العلمى والثقافى فى إمبراطوريتهم. ويدلل على ذلك أنه خلال حكمه فى بغداد، بين عامَىْ ٨١٣ و٨٣٣، أسس الخليفة المأمون أكبر مكتبة منذ عهد مكتبة الإسكندرية، ودار الحكمة، وأسس فى عام ٨٢٩ أول مرصد فلكى دائم فى العالم.

كان العالم الأكثر تألقا فى القرن التاسع هو الفارسى الخوارزمى. وكتب أول كتاب فى علم الجبر بعنوان (حساب الجبر والمقابلة)، وأسس فى الوقت نفسه نظام استخدام الأرقام التى نستخدمها اليوم (وندعوها الأرقام العربية منذ ذلك الحين على الرغم من أن أصلها هندى). وتمثلت مساهمته الأساسية المباشرة فى علم الفلك فى كتاب (سند هند زيغ) المرتكز على علم الفلك الهندوسى، وحدد به جداول لمواضع الشمس والقمر والكواكب، ودرس سلسلة من الموضوعات على غرار الكسوف وإمكان رؤية القمر.

وفى نحو الحقبة نفسها، درس الفارسى الفرجانى عناصر علم الفلك فى كتاب بعنوان (فى الحركات السماوية وجوامع علم النجوم)، وهو دراسة ترتكز على علم الفلك الخاص ببطليموس. وأدخل أفكارا جديدة منها، على سبيل المثال، أن مبادرة الاعتدالين تؤثر على الموقع الظاهرى للكواكب، وليس فقط

النجوم. وكان لذلك العمل دور كبير فى أوروبا الغربية عند ترجمته للاتينية فى القرن الثانى عشر.

وقرب نهاية القرن التاسع، برز الفلكى العربى البتَّانى الذى رصد السماء من سوريا وقام بقياسات ذات دقة ملحوظة فى تلك الحقبة. كما قام بتحديد فترة السنة الشمسية وقيمة الاعتدالين: الخريف والربيع وميل فلك البروج. وقد استفاد من ذلك أيضا فى إعداد جدول لأربعمائة وتسعة وثمانين نجمًا. ومن الجانب النظرى، فإن عمله الرئيس، (كتاب الزيغ)، يكتسى أهمية كبيرة لأنه أدخل للمرة الأولى علم حساب المثلثات فى دراسة القبة السماوية. لقد بدت تلك الرؤية الجديدة أقوى كثيرا من المنهج الهندسى لبطليموس. وتمت ترجمة ذلك الكتاب للاتينية فى القرن الثانى عشر، وأثر كثيرا على مفكرى أوروبا فى القرنين السادس عشر والسابع عشر.

فى عام ٩٩٤، أسَّس الفلكى الخوجندى، القادم من طاچاكستان الحالية، آلة السدس الجدارية الكبرى فى مرصد (راى) قرب طهران (لقياس ارتفاع الأجرام السماوية). وهى الأداة الأولى التى تسمح بإجراء قياسات أكثر دقة من طريقة "الدقيقة القوسية". وقد استخدمها بشكل خاص لتحديد قيمة أكثر دقة لميل فلك البروج.

وظهر عالم آخر فى الحقبة نفسها هو البيرونى، القادم من مناطق بحر (آرال). ومثل أسلافه، اهتم بموضوعات عديدة مثل الرياضيات والجغرافيا. وفى علم الفلك، قام بعمليات رصد لظاهرتَى الخسوف والكسوف، كما قام أيضا بدراسة أحدث للمنهج التجريبى، طبقها بوجه خاص على أسلوب تحليل الأخطاء التى تشوب قياساته وقياسات الخوجندى.

وفى القرن الحادى عشر، اهتم أيضا الفارسى عمر الخيام، المعروف اليوم بشكل أكبر بأشعاره، بموضوعات متعددة. وبوجه خاص بعلمَى الجبر والفلك. وقدم جداول جديدة فلكية تتميز بشكل خاص بتحديد مدة السنة الشمسية بدقة كبيرة بالنسبة لتلك الحقبة.

وانتهى ذلك العصر الذهبى لعلم الفلك الإسلامى فى القرن الثانى عشر. وتمت ترجمة أعمال تلك الفترة المهمة شيئا فشيئا للاتينية وبوجه خاص فى توليدو فى إسبانيا، وانتشرت فى أوروبا. وعن طريق تلك الترجمات، أعاد العلماء الأوروبيون فى نهاية العصور الوسطى اكتشاف نظريات بطليموس، وأحاطت معرفتهم بالتقدم الذى ولد فى العالم الإسلامى.

نيكولا كوبرنيكوس

جاءت الهجمة الأولى الأكثر أهمية على مفاهيم القدماء على يد كاهن بولندى هو نيكولا كوبرنيكوس، فى منتصف القرن السادس عشر. ولد كوبرنيكوس فى عام ١٤٧٣ وكان مقتنعا منذ شبابه المبكر، ربما بفضل قراءاته لأريستارخوس الساموسى، بأن الأرض ليست فى مركز العالم.

وكرس كوبرنيكوس وقت فراغه فى تجميع عمليات الرصد التى قام بها للأجرام السماوية، وحساب مداراتها، بهدف تقديم نظام جديد لتوصيف العالم. ونشر كوبرنيكوس أعماله فى عام ١٥٤٣ فى كتاب بعنوان (ثورات الأجرام السماوية). وافترض فى ذلك العمل أن الشمس موجودة فى مركز العالم، وأن الأجرام الأخرى تدور حولها، وهى بالترتيب عطارد والزهرة والأرض والمريخ والمشترى وزحل. وتمت إزاحة الأرض، التى كانت وفقا للقدماء مركز العالم، إلى مجرد كوكب يدور حول الشمس مثل باقى الكواكب.

جدير بالذكر أن نظرية كوبرنيكوس لم تكن نتيجة مباشرة لعمليات الرصد التى قام بها ولا لحساباته، لكنها كانت مجرد بناء نظرى بحت. ففى الحقيقة، لم يكن نظامه لتوصيف العالم يختلف كثيرا عن نظام بطليموس فى تقديراته للحركة الظاهرية للأجرام السماوية. وظل كوبرنيكوس فضلا عن ذلك مقتنعا بأن مدارات الأجرام السماوية ينبغى أن تكون دائرية، تمضى الكواكب فيها بسرعات ثابتة. ولتفسير الحركة غير المنتظمة للكواكب، كان ينبغى عليه هو الآخر إدخال فلك التدوير وتشييد نظام شديد التعقيد.

وكان نظام كوبرنيكوس يتسم بمزية كبرى وهى بساطته الشديدة. فقد كان يفسر بشكل خاص الحركة التراجعية للكواكب دون اللجوء لفلك التدوير، لكن ببساطة بتداخل حركة الكواكب مع حركة الأرض. وكان قد تم طرح حركة الدوران وانطلق فلكيون آخرون سريعا فى العمل على تشييد علم الفلك على أُسس أكثر صلابة، عن طريق تحسين وسائل الرصد وتقديم الجهود فى فهم مدارات الكواكب.

تايكو براه

بعد التشكيك فى فكرة اعتبار الأرض مركزا للعالم فى نهاية القرن السادس عشر، انهار مفهوم ثبات السماء، الذى كان يُعد الشق الثانى لمفهوم علم الفلك لدى القدماء. حدث ذلك حين ظهر فى السماء، فى عام ١٥٧٢، نجم جديد، ظل يلمع لمدة عام ونصف العام، وكان مرئيا فى صميم النهار خلال الشهر الأول لظهوره.

إننا نعرف اليوم أن ذلك الوميض كان لحالة نجم داخل مجرتنا تعرض لانفجار سوبرنوفا. ووفقا لعلماء الفلك فى تلك الفترة، والذين كانوا يعملون بمرجعية أرسطو عن ثبات السماء، فإن تلك الظاهرة لم تكن لتحدث إلا داخل الإطار الكروى للقمر، وبالتالى فهى قريبة جدا من الأرض، حيث توجد مملكة عدم التمام والتغير. لكن بفضل قياسات دقيقة لموضع النجم الجديد، كشف الفلكى الدانمركى تايكو براه أن ذلك النجم كان ثابتا بالنسبة للنجوم الأخرى. وبالتالى فإذا كان الجرم الجديد قريبًا بحق من الأرض، لكان عليه أن يتحرك فى السماء مثل الكواكب. ووصل تايكو براه من هنا للحل الوحيد الممكن وهو أن النجم الجديد موجود بالضرورة أبعد من الكواكب الأخرى، أى فى مجال النجوم. إذن فالسماء ليست ساكنة، وإنما تخضع مثل الأرض للتغير، ويبدأ من هنا الشك فى صحة مبدأ أرسطو.



تايكو براه (١٥٤٦ ـ ١٦١٠)

وتم التأكد من تلك الشكوك بعد ذلك بخمسة أعوام، فى عام ١٥٧٧، حين رصد تايكو براه مرور مُذنّب لامع، وقام بتحليل حركته. لقد أظهرت عمليات الرصد هذه المرة أن المذنب كان يتحرك بالنسبة للخلفية المكونة من نجوم، لكن بشكلٍ أبطأ من القمر. لا بد إذن أن يكون المُذنّب هو أيضا أبعد من مدار القمر، على الرغم من أنه حتى ذلك الوقت كانت المذنبات تُعد ظواهر تنتمى للغلاف الجوى الأرضى. وأكدت بالتالى عمليات رصد ذلك المذنب النتائج التى

تم التوصل إليها عام ١٥٧٢ مع الكشف عن ثانى جرم سماوى يخضع للتغيرات.

وقاد رصد ذلك المذنب لأمور أبعد. فقد أظهر تايكو براه، مع تحليل مساره، أن ذلك المسار ليس دائريا لكن له شكل إهليجي أو بيضوى. وبدأت بشكل مماثل الركيزة الأخيرة للفكر الأرسطى، وهى الحركة الدائرية للكواكب، فى التخلخل.

وقام تايكو براه فى عام ١٥٧٦ ببناء مرصد على جزيرة بالدانمرك، وأمضى به أكثر من عشرين عامًا فى إجراء قياسات للموضع الدقيق للكواكب والنجوم الأكثر لمعانا. وعلى الرغم من أن المرقبين الكاسر والعاكس لم يكونا قد تم اختراعهما بعد، فقد نجح فى الحصول على نتائج تتسم بدقة لا مثيل لها فى تلك الفترة، ونجح فى تقديم خريطة للنجوم بقيت مرجعا لوقت طويل. وقد قدم، بشكل خاص، مجموعة من عمليات الرصد الدقيقة لحركة الكواكب فى السماء، وهى العمليات التى شكلت أساسا لفهمنا النهائى لمدارات الكواكب، والتى بدأ بها الفلكى الألمانى جوهان كبلر أعماله.

جوهان كبلر

ولد جوهان كبلر فى عام ١٥٧١ وبدأ عمله كمساعد لتايكو براه. ومع موت ذلك الأخير، أصبحت عمليات الرصد الدقيقة للكواكب، والتى تراكمت خلال عشرين عامًا، تحت تصرف كبلر. واهتم الفلكى الألمانى بشكل خاص بمتابعة حركة المريخ الذى لم يقم أى نموذج للعالم بتفسير حركته.

وبعد حسابات مضنية، استطاع كبلر تحديد سبب عدم الانتظام فى حركة المريخ، حيث لم يكن مدار ذلك الكوكب حول الشمس دائريا لكن كان يتخذ شكلا بيضويًا أو إهليجيًا. ونشر كبلر تلك النتيجة عام ١٦٠٩ فى كتاب بعنوان (علم الفلك الجديد)، وقضى نهائيا على المبدأ القديم المتعلق بدائرية مدارات الكواكب.

وأظهر كبلر كذلك أن المريخ لا يقطع مداره بسرعة ثابتة، وإنما تتحدد سرعته وفقا لمدى بعد الكوكب عن الشمس. فقد اكتشف كبلر أن الشمس، فى الحقيقة، ليست موجودة فى مركز الإهليج الذى يقطعه المريخ، لكن فى نقطة مُزَاحة قليلا تدعى بؤرة الإهليج. وحين يمر الكوكب عند نقطة الإهليج الأقرب من تلك البؤرة، والتى تدعى نقطة الرأس، فإن سرعته تصل لأقصى حد لها، وحين يمر عند النقطة الأكثر بعدا، وهى الأَوْج، فإن سرعته تكون عند حدها الأدنى.

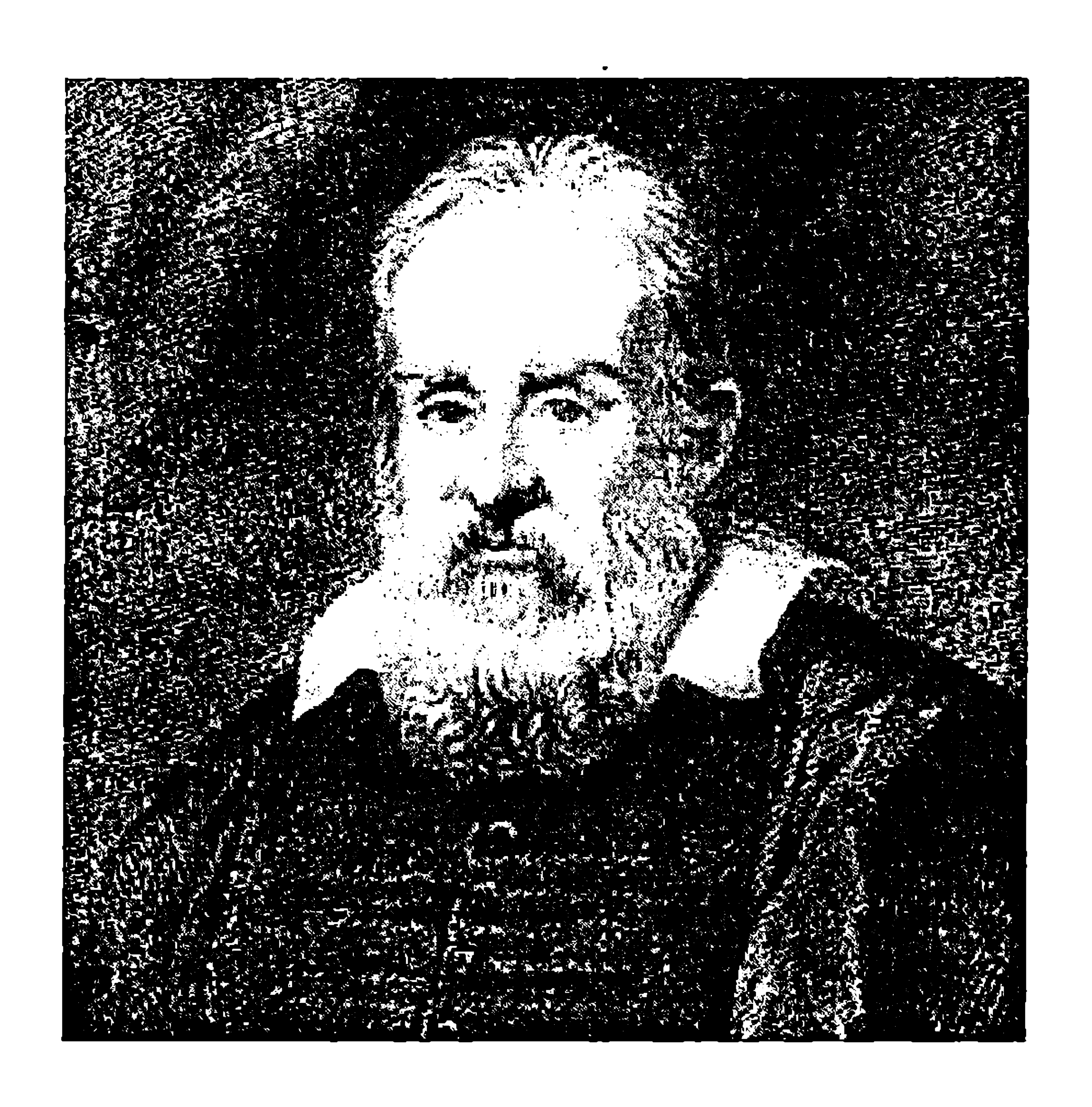


جوهان كبلر (١٥٧١ ـ ١٦٣٠)

وبعد نجاح دراسته للمريخ، بدأ كبلر فى دراسة الكواكب الأخرى. وبعد عدة سنوات من الحسابات، وضع الفلكى الألمانى قانونًا شديد الأهمية يصف حركة كل كوكب حول الشمس. وأظهر أن مربع فترة دوران كوكب ما حول الشمس، أى الوقت اللازم ليكمل دورة كاملة، يتناسب مع مكعب حجم مداره. وقد انطوى

ذلك القانون على أهمية كبرى، لأنه كان يكفى معه تحديد أحد تلك المقاييس، إما الفترة وإما بعد المدار، لتحديد المقياس الثانى بشكل مباشر. فضلا عن ذلك، بما أن ذلك القانون يعم كل الأجرام التى تدور فى مدار حول أجرام أخرى، فقد سمح بعد ذلك بتحديد كتلة العديد من الأجرام السماوية، بما فى ذلك كتلة كوكب بلوتو أو كتلة العديد من النجوم المزدوجة.

جاليليو جاليلى



جاليليو جاليلى (١٥٦٤ ـ ١٦٤٢)

وبالتوازى مع أعمال كبلر، حدثت قفزة كبرى فى مجال الرصد. ففى بداية القرن السابع عشر، تولدت لدى بعض العلماء الهولنديين فكرة لعبة تستخدم العدسات لتكوين أداة بصرية قادرة على تكبير الصور وهى النظارة المُكبِّرة

(المرقب الكاسر للضوء). وكان استخدام تلك الأداة مقتصرًا فى البداية على العسكريين. لكن فى عام ١٦١٠، صنع الفلكى الإيطالى جاليليو جاليلى مِرْقَبه الخاص، ووجهه صوب السماء، وتوالت الاكتشافات فى فترة قياسية من الزمان.

ووصف جاليليو فى العام ذاته العجائب التى كان قد كشفها فى كتابه (رسول النجوم): فلم يعد درب التبانة يبدو مثل رقعة ضبابية، لكن اتضح أنه يتكون من آلاف النجوم، ولم يعد سطح القمر ناعما لكن باتت له تضاريس من الجبال والفوهات، وتبين أن كوكب المشترى يصحبه موكب من أربعة من الأقمار التى تدور فى فلكه، وبعد ذلك بقليل قام جاليليو باكتشافات أخرى، فكوكب زحل ليس كُرِّيًا بل هو على هيئة قرص غير منتظم وهو دليل على وجود عدة أجسام تدور حوله، وكوكب الزهرة ليس على شكل ثابت، بل يمر بأطوار متعاقبة على غرار قمرنا. وتوصل فى نهاية المطاف، إلى أن قرص الشمس ليس منتظما، ولكن يحتوى على بقع قاتمة صغيرة.

لقد كانت عمليات الرصد التى قام بها جاليليو بمثابة الضربة القاضية للمفهوم الأرسطى عن العالم، وبوجه العموم بالنسبة للوسط العلمى. فقد كانت البقع على القرص الشمسى، وكذلك جبال وفوهات القمر، تثبت أن الأجرام السماوية بعيدة تمامًا عن الاكتمال الذى افترضه فيها أرسطو. وقدمت أقمار المشترى الدليل على أن الأرض ليست مركز كل الحركات السماوية. وفى نهاية المطاف، لم يكن من الممكن تفسير أطوار الزهرة إلا بحقيقة أن ذلك الكوكب يدور حول الشمس وليس حول الأرض.

وفى ضوء تلك الاكتشافات، قام جاليليو فى عام ١٦٣٢ بنشر كتابه بعنوان (حوار حول النظامين الأساسيين بالعالم)، وكان يقارن فيه بين نظام العالم وفقا لبطليموس ووفقا لكوبرنيكوس. وبطرح جاليليو لحقيقة أن نظام كوبرنيكوس صحيح، فقد أثار غضب الكنيسة التى كانت تعتنق نظرية أرسطو منذ القرن الثالث عشر. وبرغم حذر جاليليو أثناء تقديم نظام كوبرنيكوس كنموذج بسيط، فإنه قد أُجبر على ترك ذلك المشروع، وتم وضع كتبه فى قائمة

الكتب المحرمة عام ١٦٣٥. لكن مسيرة التقدم العلمى كانت تتقدم ولم يعد هناك ما يمكنه إيقافها.

جدير بالذكر أيضا أن عمليات رصد السماء بمساعدة مرقب لم تكن مساهمة جاليليو الوحيدة فى العلم. ففى بداية عمله، كان الفلكى الإيطالى يهتم بمشكلة حركة الأجرام حول الأرض. وأظهر، بتناول حركة الأجرام السماوية على المستوى المنحنى، أن أفكار أرسطو فى ذلك المجال كانت خاطئة هى الأخرى. كان الفيلسوف اليونانى يعتقد أن جسما ما، معزولا عن كل تأثير خارجى، قد يكون له ميل بالضرورة لئلا يتحرك. وأظهر جاليليو بتجاربه أن ذلك أمر خاطئ، وأن مثل ذلك الجرم يستمر فعليا فى التحرك بسرعة ثابتة. وقام إسحق نيوتن بتناول تلك الفكرة، وصاغ منها أحد قوانينه للحركة.

إسحق نيوتن

بعد أعمال كبلر وجاليليو، تم التوصل، فى نهاية المطاف، لتوصيف صحيح لحركة الكواكب. بيد أن ذلك التوصيف لم يكن كاملا لأنه لم يكن يقدم أى تفسير لسبب حركة الكواكب، ولم يكن يفسر على سبيل المثال السبب فى أن المدارات إهليجية بدلا من أن يكون لها شكل آخر.

وكان إسحق نيوتن، الفيزيائى الإنجليزى الذى ولد عام ١٦٤٢، هو الذى قدم فى نهاية المطاف الإجابة عن تلك التساؤلات، مكملا بهذا الشكل عملية التوصيف الكامل لحركة الكواكب.

حين بدأ نيوتن عمله كفيزيائى، كان التوصيف السائد لحركة الأجرام السماوية ما زال يميز بين الأرض والسماء. فمن جانب، كانت هناك حركة الأجرام السماوية التى تخضع لقوانين كبلر. ومن جانب آخر، كانت هناك حركة الأجسام الأرضية التى تتبع القوانين التى طرحها جاليليو. مجموعتا القوانين كانتا تبدوان مختلفتين بشكل كامل وغير قابلتين للتوفيق بينهما. لكن فى عام ١٦٦٦، قدم نيوتن منطقا فتح الباب للمصالحة بين المفهومين.

فلنتخيل أننا وضعنا مدفعا على قمة جبل، وأنه من الممكن استخدام ذلك المدفع لإطلاق قذائف بقوة كبيرة عشوائيا، وأن القذائف لن تتوقف بسبب الغلاف الجوى. لو أننا وضعنا قليلا من البارود فى المدفع، ستنطلق القذيفة لعدة عشرات من الأمتار. وبزيادة كمية البارود، سنتمكن من إرسالها أبعد فأبعد، حتى كيلومتر وحتى عشرة كيلومترات، وهلم جرًا. القذيفة ستتعرض لجاذبية الأرض، وستكون خاضعة لقوانين جاليليو لحركة الأجسام. لكن مع استمرار الزيادة فى قوة المدفع، سوف ننجح، عند وقت بعينه، فى إطلاق القذيفة للجانب الآخر من الأرض. ثم فى النهاية سنصل لمستوى تكمل فيه القذيفة الدوران حول الأرض قبل أن تمر فوق رءُوسنا وتكمل التحليق. إن القذيفة ستكمل فى تلك الحالة مسارا دائريا أو إهليجيًا حول الأرض؛ بمعنى أنها ستتخذ مدارا وستخضع لقوانين كبلر بشأن حركة الأجرام السماوية.

بذلك المنطق، النظرى تماما، نجح نيوتن فى التوفيق بين مختلف أنواع الحركة، حيث يتطابق مدار كبلر للحركة الكوكبية مع حركة المقذوف عند جاليليو. بعد ذلك الكشف، عكف نيوتن على تحويل أفكاره لنظرية رياضية قادرة على وصف حركة أى جسم. وبما أن نتائج محاولاته الأولى لم تكن بقدر طموحاته، فقد هجر الموضوع لفترة طويلة. ومر بهذا الشكل نحو عشرين عامًا قبل أن يضع نيوتن نظريته ثم ينشرها فى نهاية المطاف فى عام ١٦٨٧ فى كتابه (المبادئ الرياضية للفلسفة الطبيعية).

قانون الجاذبية الكونية

وقد أظهر نيوتن، فى ذلك العمل، أن العديد من الظواهر، وبشكل خاص حركة الأجرام السماوية وكذلك مسألة سقوط الأجسام، يمكن تفسيرها بوجود قوة تؤدى للتجاذب المتبادل بين كل الأجسام. إن ذلك يعنى على سبيل المثال، أن قوة جاذبية الشمس هى التى تنظم حركة الكواكب، وقوة جاذبية الأرض هى التى تؤدى لسقوط الأجسام على سطحها. وبالارتكاز على قوانين كبلر، نجح نيوتن فى تقديم نموذج رياضى يعبر عن تلك القوة، ونجح بهذا الشكل فى طرح

قانون للجاذبية الكونية. يقول القانون بأن مقدار قوة الجذب بين جسمين يتناسب مع ناتج ضرب كتلتيهما ويتناسب عكسيا مع مربع المسافة بينهما.

انطلاقا من ذلك القانون للجاذبية الكونية، استطاع نيوتن تقديم تحليل رياضى للعديد من الظواهر؛ فقد برهن على أن الكواكب ينبغى فعليا أن تتبع مدارا إهليجيا حول الشمس. وأكد كذلك كل القوانين التى اكتشفها كبلر. وأظهر أن حركة الأجرام السماوية ليست بالضرورة إهليجية. فبعض الأجسام، وبوجه خاص بعض المذنبات، تتبع مدارات مختلفة تُدعى "قطع مكافئ" أو "قطع زائد". إن هذه المنحنيات، على عكس الإهليج، تكون مفتوحة، وينتهى الأمر بالأجسام التى تقطعها بالابتعاد بشكل أبدى عن الشمس. وكان نيوتن كذلك هو أول من نجح فى تقدير الكتلة النسبية لكل من الأرض والشمس والكواكب الأخرى. وفى نهاية المطاف، فقد سمح له قانون الجاذبية الكونية بتفسير ظواهر أرضية مثل ظاهرة المَدِّ والجَزْر، الناجمة عن تأثير قوة جذب القمر على الأرض، أو شكل كوكبنا والانتفاخ الاستوائى به.

ميكانيكا السماء

لقد كان ذلك القانون للجاذبية الكونية بمثابة مولد فرع جديد لعلم الفلك، وهو ميكانيكا السماء التى تُعنى بدراسة حركة الأجرام السماوية تحت تأثير الجاذبية.

كان أحد أول نجاحات ميكانيكا السماء هو ثمرة أعمال إدموند هالى. فقد استخدم ذلك الفلكى الإنجليزى القانون الجديد لتحديد مدارات عدة مذنبات. وسرعان ما اكتشف أن المذنبات اللامعة التى تم رصدها فى عام ١٥٣١ وعام ١٦٠٧ وعام ١٦٨٢ ما هى فى الحقيقة إلا تَبَدِّيات مختلفة لجرم سماوى واحد. وقد نجح فى التكهن فى عام ١٧٠٥ بأن مذنب هالى، الذى حمل اسمه منذ ذلك الحين، سوف يعاود الظهور عام ١٧٥٩. وحدث ذلك بالفعل مثلما كان متوقعا، وأكد بشكل مُدوٍّ على صحة نظرية نيوتن.

واستمرت ميكانيكا السماء ودراسة المجموعة الشمسية فى التطور فى القرن الثامن عشر والقرن التاسع عشر بمساهمات العديد من الفلكيين، وبوجه خاص الفرنسيان بيير سيمون دى لابلاس وچوزيف لويس لاجرانج. لكن فى عام ١٨٤٦، مع اكتشاف كوكب نبتون، فقد عرفت ميكانيكا السماء النجاح الأكثر إبهارا.

أوربان لوفرييه

فى عام ١٧٨١، اكتشف الفلكى الإنجليزى ويليام هرشل بالصدفة جرما يتحرك ببطء فى السماء. وأظهرت عمليات الرصد المتواصلة أنه كوكب جديد يضاف للكواكب الستة المعروفة منذ الحضارات القديمة، وتمت تسميته بعد ذلك أورانوس. وأظهرت دراسة حركة ذلك الجرم على امتداد عشرات الأعوام أن مداره ليس ملتزما تماما فيما يبدو بقوانين نيوتن، وإنما كان ينحرف بشكل طفيف بالنسبة للمتوقع. وكانت ثمة وسيلة واحدة لتفسير تلك الظاهرة هى افتراض وجود كوكب ثامن ما زال مجهولا، يربك حركة أورانوس بتأثيره الجذبوى عليه.

وبدأ فى ذلك الحين خبيران بالميكانيكا السماوية؛ هما الفرنسى أوربان لوفرييه والإنجليزى چون كوش أدامز فى إجراء حسابات شديدة التعقيد، سعيا إلى تحديد وضع ذلك الكوكب المجهول انطلاقا من دراسة الخلل فى حركة أورانوس. وتوصل كلاهما لنتائج مشابهة فى عام ١٨٤٦، لكن أوربان لوفرييه هو الذى نجح فى التحقق من حساباته أولا، وقام بإرسال توقعاته لموضع الكوكب لجوهان جوتفريد جال الفلكى بمرصد برلين. ونجح ذلك الأخير، منذ الليلة الأولى للرصد، فى تأكيد وجود كوكب جديد، أطلق عليه اسم نبتون، فى موقع قريب بشدة من الموضع المتوقع نظريا. وكان ذلك نصرا لميكانيكا السماء التى تتيح التكهن النظرى بوجود جرم ما وموضعه فى السماء، وهو أمر ما كان ليحدث قط فى الماضى.

[٢]

الفيزياء الفلكية والرصد الفلكى

الموجات الضوئية

وفتحت الميكانيكا السماوية المجال لسلسلة من النجاحات المدوية فى علم الفلك. ومع ذلك، فقد بقى مجال تطبيقها محدودا للغاية، حيث لم تكن تصف سوى موضع الأجرام السماوية وحركتها دون أن تتطرق لطبيعتها. وفى القرن التاسع عشر فقط، ظهر منهج جديد فى البحث، وهو التحليل الطيفى الذى أفسح المجال لدراسة الطبيعة الفيزيائية للأجرام السماوية وبدأ معه مولد الفيزياء الفلكية.

لكن قبل دراسة تطبيقات ذلك المنهج الجديد فلنبدأ بالتعرف على الظاهرة التى يستند إليها وهى الضوء. كانت الألوان المختلفة ومصدرها مسألة تستحوذ كثيرا على اهتمام الفيزيائيين. وكان إسحق نيوتن أول من قدم تفسيرا صحيحا لها. فقد بيَّن أن الضوء المرئى، فى حقيقة الأمر، مكون من تركيب متداخل من كل ألوان قوس قُزَح. ولإظهار هذه الألوان المختلفة، يكفى تمرير الضوء عبر منشور زجاجى. من شأن ذلك أن يجعل كل لون يتخذ مسارا مستقلا عن الألوان الأخرى ومن ثَم يظهر بطريقة متباينة عن غيره. ويمكن بالتالى تحليل الضوء الأبيض إلى مكوناته الأصلية فيظهر تتابع للألوان يُسمى الطيف.

غير أن الإجابة عن السؤال الأكثر أهمية حول طبيعة الضوء استغرقت وقتا طويلا. ففى الجزء الثانى من القرن التاسع عشر، توصل الفيزيائى الاسكتلندى چيمس كلارك ماكسويل إلى إحدى القواعد الرئيسة الكبرى للفيزياء الكلاسيكية: النظرية الموحدة للظواهر الكهربائية والمغناطيسية، والتى لا تزال تستخدم حتى يومنا هذا. لقد كانت إحدى النتائج الأكثر أهمية لتلك النظرية توضيح الصلة اللصيقة بين المجال الكهربائى والمجال المغناطيسى. كان الفيزيائيون حتى ذلك الحين يعرفون بالفعل أن مجالا مغناطيسيا متغيرا يمكنه توليد مجال كهربائى مثل مُولِّد الدراجة على سبيل المثال. لكن ماكسويل أظهر أنه يمكن بالعكس لمجال كهربائى متغير أن ينشئ مجالا مغناطيسيا.

تنطوى تلك الظاهرة على تطبيق بالغ الأهمية. فلنتخيل أن مجالا كهربائيا يتأرجح فى نقطة ما. وفقا لماكسويل، فإن التأرجح سوف يولد مجالا مغناطيسيا حول تلك النقطة. ومن شأن المجال المغناطيسى المُخلَّق بهذا الشكل أن يكون متغيرا ومن ثَم سوف يولد بدوره مجالا كهربائيا، وذلك الأخير سوف يولد مجالا مغناطيسيا جديدا وهكذا دواليك. يمكن بهذا الشكل أن يستمر المجالان على هذا المنوال، وبالتالى سرعان ما تتسع دائرة التأرجح الأصلى وتنتشر فى كل الاتجاهات حول نقطة البدء، مثلما تنتشر الموجة على سطح المياه، ولذلك يُطلق على هذه الظاهرة اسم الموجة الكهرومغناطيسية.

وقد حسب ماكسويل فى ستينيات القرن التاسع عشر سرعة انتشار الموجة الكهرومغناطيسية وقدَّرها بنحو ثلاثمائة ألف كيلومتر فى الثانية. ولما كان هيبوليت فيزوه وچون فوكولت قد قاسا قبل ذلك بعدة سنوات سرعة الضوء وحصلا على نتيجة قريبة من ذلك المقدار، استخلص ماكسويل النتيجة التى فرضت نفسها والمتمثلة فى أن الضوء يمكن تفسيره باعتباره موجة كهرومغناطيسية؛ أى تأرجحا متزامنا بين مجال كهربائى ومجال مغناطيسى ينتشر بسرعة خارقة تبلغ ثلاثمائة ألف كيلومتر فى الثانية.

الموجة الكهرومغناطيسية

لتوصيف موجة ما، فإن المُعامِل الأكثر أهمية هو ما نطلق عليه الطول الموجى. فى حالة الموجات المائية، فإن الطول الموجى هو المسافة التى تفصل بين موجتين متعاقبتين. أما فى حالة الموجات الضوئية، فإن الطول الموجى هو المسافة التى تفصل النقطتين اللتين يبلغ عندهما المجال كثافة قصوى خلال تأرجحه. وبالنسبة للضوء المرئى، فإن ذلك الطول الموجى يكون صغيرا للغاية. ويتم وصفه بالميكرومتر، أى بجزء من المليون من المتر، ويتأرجح بين (٠,٤) و(٠,٧٥) ميكرومتر.

ويرتبط اللون الذى نراه بالنظر لجسم ما بالطول الموجى للضوء المشع من ذلك الجسم. بهذا الشكل، فإن حزمة ضوئية ذات طول موجى يقترب من (٠,٨) ميكرومتر تبدو لنا حمراء. وإذا كان الطول الموجى قريبا من (٠,٥) ميكرومتر، فإن اللون يكون أصفر. وقرب (٠,٤) ميكرومتر يكون بنفسجيا. ويتكون الضوء الأبيض – ضوء الشمس على سبيل المثال – من العديد من الأطوال الموجية المختلفة، وبالتالى من الألوان المختلفة.

ولا يقتصر طيف الموجات الكهرومغناطيسية على الضوء الذى يمكننا رؤيته. لقد اكتشف الفيزيائيون منذ القرن التاسع عشر نطاقا كبيرا من الإشعاعات غير المرئية لأعيننا. ولذلك عندما كان ويليام هرشل يدرس فى بداية القرن العشرين طيف الضوء الشمسى باستخدام منشور زجاجى ومقياس حرارى، لاحظ ارتفاعًا فى درجة الحرارة حين يتعرض لضوء فى حيز ألوان الطيف المرئى، وهو ما لم يكن يمثل مفاجأة، لكن لاحظ كذلك أن الارتفاع فى درجة الحرارة يحدث أيضا مع تحريك الترمومتر إلى ما بعد حيز الضوء الأحمر من الطيف المرئى. هناك إذن شكل من الضوء غير مرئى لأعيننا، وهو مع ذلك حقيقى. إن ذلك الإشعاع المسمى بالأشعة تحت الحمراء معروف الآن فى يومنا هذا، ويستخدم على سبيل المثال فى التحكم عن بُعْد (الريموت كنترول) أو فى نظم اكتشاف الحرارة. ويغطى نطاقا من الأطوال الموجية أكبر من مثيلتها فى مجال الضوء المرئى، تتراوح بين (٠,٨) ميكرومتر وملليمتر واحد.

وإذا انتقلنا إلى نطاقات أخرى من الأطوال الموجية الأكبر، فإننا ندخل فى مجال موجات الراديو التى كشفها هنريش هرتز فى عام ١٨٨٨. إن تلك الموجات معروفة لدينا فهى التى تتيح بث برامج الراديو والتليفزيون والاتصال بالأقمار الصناعية، وهى أيضا مستخدمة فى أفران الميكروويف.

وإذا كانت هناك نطاقات من الإشعاع ذات الأطوال الموجية الكبيرة، فهناك فى المقابل نطاقات إشعاعات أخرى ذات أطوال موجية أقل من أطوال موجات الضوء المرئى. فإذا تراوح الطول الموجى بين (٠,٠١) و(٠,٤) ميكرومتر، فإننا نكون بصدد الأشعة فوق البنفسجية المعروفة بآثارها المؤدية لسرطان الجلد. ثم تأتى بعد ذلك الأشعة السينية (أشعة إكس) التى تُستخدم لرصد ما بداخل الجسد البشرى، ثم نصل فى نهاية المطاف إلى أشعة جاما شديدة الخطورة، والتى تنتج على سبيل المثال إبان التفاعلات النووية.

التحليل الطيفى

من شأن دراسة طيف الضوء القادم من جرم سماوى أن تتيح للفلكيين التعرف على كَمّ ضخم من المعلومات عن هذا الجرم. فى الواقع، يمكن اعتبار طيف أحد الأجرام بمثابة بطاقة هوية؛ فبتحليله بعناية، يمكننا تحديد العديد من الخصائص عن الجرم مثل حرارته وتركيبته الكيميائية أو سرعته.

الطيف والحرارة

فلنبدأ بالخاصية الأكثر أهمية وهى الحرارة. فلنتخيل على سبيل المثال حالة معدن يتعرض للتسخين. فى البداية، حين تصل درجة حرارة المعدن إلى عدة مئات من الدرجات، فإنه لا يوجد ما يمكن رؤيته بالعين المجردة. بيد أنه من الممكن استشعار حرارة المعدن بوضع أيدينا بالقرب منه. ويدلل ذلك الإحساس على أن المعدن يطلق أشعة تحت الحمراء، تسخن اليد، لكنها غير مرئية. وحين تستمر الحرارة فى الزيادة، يبدأ المعدن شيئا فشيئا فى اللمعان وفى أن يضوى، ويتغير لونه كذلك شيئا فشيئا وينتقل من اللون الأحمر إلى البرتقالى

ثم الأصفر. وهذا يعنى بالتالى أن الضوء المنبعث من جسم ما يرتهن بحرارته. وعند عدة مئات من الدرجات، يطلق المعدن أشعته فى مجال الأشعة تحت الحمراء. وعند ثلاثة آلاف درجة، فإنه يطلق إشعاعه بشكل خاص فى مجال اللون الأحمر، وعند ستة آلاف درجة فى مجال الأصفر.

نستخلص من ذلك أن دراسة طيف جسم ما تتيح لنا، فى حالة المعادن، تحديد حرارته. بهذا الشكل، وبما أن سطح الشمس يبدو لنا باللون الأصفر، يمكننا القول بأن حرارته تكون عند درجة ستة آلاف درجة مئوية. لقد تم طرح العلاقة بين الحرارة والطول الموجى للبَثِّ الأقصى فى عام ١٨٩٣ عن طريق ويليام وين. غير أن هذه العلاقة لا تنطبق على جميع الأجرام، لكن تنطبق فقط على فئة من الأجسام النظرية والتامة تدعى الأجسام السوداء. ولحسن حظنا، فإن النجوم لها سلوك شديد التشابه بجرم أسود. وتسمح لنا دراسة طيف النجوم بالتالى بتحديد حرارتها.

وعلى المستوى العام يمكن القول بأن الأجسام الصلبة والسوائل والغازات الكثيفة ينبعث منها إشعاع متواصل يخضع نسبيا لقانون وين. من هذا المنطلق فإن من شأن سحابة فضائية باردة من الغاز والغبار أن تبعث إشعاعها فى مجال الأشعة دون الحمراء. وتطلق الشمس إشعاعها فى الجانب الأصفر على وجه الخصوص من الطيف المرئى، ويصدر الغاز فى تجمع مَجَرِّى تبلغ حرارته عدة ملايين من الدرجات، أشعة إكس بشكل أساسى. وفى الأحوال كافة، فإن رصد طيف تلك الأجرام هو الذى سمح لنا بتحديد حرارتها.

الخطوط الطيفية

ويختلف الأمر عندما يكون الجسم محل الدراسة غازا قليل الكثافة. لقد تم الكشف عن ذلك فى عام ١٨١٤ عن طريق چوزيف فون فرونوفر الذى كان يعكف على دراسة طيف الطبقات السطحية للشمس. لقد اكتشف ذلك الفلكى وهو يرصد الطيف بدقة شديدة أن ذلك الطيف ليس متواصلا وإنما يُظهر عديدا من الخطوط الصغيرة المعتمة تدعى الإشعاع الطيفى. وتقترن تلك الخطوط

بأطوال موجية كانت، لسبب لم يكن معروفا فى تلك الفترة، غائبة عن الإشعاع الشمسى.

وفى مبادرة لتفسير ذلك الغموض أنشأ الفيزيائيان روبرت بنسُن وجوستاف كيرشوف معا مقياسا للتحليل الطيفى، أى أداة تهدف لتحليل الضوء إلى أطواله الموجية ولتكبير الطيف الذى يتم الحصول عليه، بشكل كبير. وقد استخدما جهازهما الجديد لدراسة إشعاع مختلف أنواع الأجسام وبشكل خاص الغازات. واكتشفا وقتها ظاهرة شديدة الغرابة، وهى أن طيف الغاز الساخن كان فى الواقع مجموعة من الإشعاعات اللامعة - تدعى إشعاعات البث - دون أى خلفية متواصلة. وأيضا بشكل شديد الغموض، لاحظا أنهما حين رصدا الضوء المنبعث من جسم أسود بعد المرور فى غاز بارد، كان الطيف متواصلا لكن يتخلله الكثير من الإشعاعات القاتمة وهى أشعة امتصاص مثلما فى حالة الشمس.

واستنتج بنسن وكيرشوف من تجاربهما أن مكونات الغاز على عكس الأجسام السوداء، لا يمكنها أن تطلق أو تمتص الضوء إلا فى نطاق أطوال موجية محددة. وحين رصدا غازا ساخنا كان الطيف مشكلا من إشعاع نطاق الأطوال الموجية التى يمكن لتلك المكونات أن تبثها. لكن عند رصد غاز بارد أمام جسم أسود، فإن مكونات الغاز كانت تمتص الضوء فى نطاق تلك الأطوال الموجية، ومن هنا تأتى إشعاعات الامتصاص التى تتداخل مع الطيف المتواصل للجسم الأسود.

وتوصل بنسن وكيرشوف إلى اكتشاف يفوق ما سبق فى أهميته؛ حيث لاحظا أن كل نوع من الغاز يقترن بمجموعة محددة من الإشعاعات. على سبيل المثال، فإن غاز الصوديوم يتسم بإشعاعين فى النطاق الأصفر من الطيف المرئى. كان ذلك الكشف يمثل تقدما هائلا لأنه انطلاقا من دراسة طيف الغاز وإشعاعاته، يصبح من الممكن تحديد تكوينه. هكذا على سبيل المثال، لو تبين أن طيف غاز مجهول ينطوى على الشعاعين الأصفرين السابق ذكرهما فذلك يعنى أن الغاز يحتوى على الصوديوم. لقد أصبح بالتالى

من الممكن بفضل التحليل الطيفى أن نحدد التكوين الكيميائى لجسم بعيد، وهو ما شكَّل مدخلا كان بعيد المنال لدراسة الأجرام السماوية.

تأثير دوبلر

لم تكن تطبيقات التحليل الطيفى مقصورة على تحديد الحرارة والتكوين الكيميائى للأجرام؛ بل إنها أتاحت التعرف على معلومة أخرى مهمة وهى سرعة الأجرام المرصودة.

تأثير دوبلر وقياس السرعات

فلنتخيل أنك ترصد جرما ما يبث إشارات صوتية ترددية بينها فواصل زمنية ثابتة تُعرف باسم الدورة. حين يكون الجسم ساكنا فإنك ستسمع الإشارات الصوتية الواحدة تلو الأخرى، يفصلها عن بعضها الفاصل الزمنى نفسه. لكن فلنتخيل الآن أن الجسم يقترب منك بسرعة لا تبعد كثيرا عن سرعة الصوت. لا يمكن اعتبار انتقال الموجات من الجسم حتى أذنك فوريا، وينبغى الأخذ فى الحسبان بالزمن اللازم لانتشار الصوت.

ومن ثَمَّ إذا صدرت الرنة الصوتية الأولى عند وضع بعينه، فإن الرنة الثانية سوف تُبث من مسافة أقل. سيكون زمن انتقال الرنة الأولى أكبر منه بالنسبة للثانية. وبالنسبة لمسمعنا، فإن الفاصل الزمنى بين الرنتين لن يستمر بمقدار الدورة الزمنية الحقيقية للإشارة الصوتية لأن الرنة الثانية ستقطع مسافة أقل، وبالتالى فإنها ستصل بشكل أسرع من الرنة الأولى. بهذا الشكل، لو أن الجسم يقترب منا، فإن الدورة الزمنية للصوت تكون أصغر من الدورة الزمنية الحقيقية. وبالعكس لو أن الجسم يبتعد فإن الدورة الزمنية الظاهرية تكون أكبر من تلك الحقيقية.

وأُطلق على تلك الظاهرة اسم تأثير دوبلر، نسبة إلى الفيزيائى الذى اكتشفها. وفى حالة الموجات الصوتية، فإن من النتائج الملموسة لتلك الظاهرة تغير صوت بوق سيارة الإسعاف عندما تمر سريعا أمامنا. فحين يقترب البوق

تقل فترة الصوت ويصبح الصوت أكثر حدة، لكن فحين تبتعد تطول البرهة الزمنية ويصير الصوت عريضا.

وينسحب تأثير دوبلر كذلك على الموجات الضوئية. ومن ثم حين يقترب المصدر منا، يقل الطول الموجى الظاهرى لإشعاعه، وتنتقل إضاءته للنطاق الأزرق من الطيف المرئى، ونتحدث حينذاك عن إزاحة فى اتجاه اللون الأزرق. وبالعكس لو أن المصدر يبتعد، يزيد الطول الموجى وينزاح الضوء نحو اللون الأحمر. وبما أن الإزاحة فى الطول الموجى مرتبطة بشكل مباشر بسرعة الجسم، فإن كل معيار يسمح بتحديد المعيار الآخر. على سبيل المثال، لو نريد أن نعرف السرعة النسبية لنجم ما من نوع الشمس، يكفى أن نحصل على طيفه ومقارنته بطيف الشمس، وقياس الإزاحة بين النجم وبين الشمس، واستنباط السرعة المطلوبة بشكل مباشر.

إن استخدام ذلك المنهج لقياس السرعات منتشر للغاية فى كل مجالات علم الفلك، حيث نستخدمه على سبيل المثال لتحديد سرعة الانتقال وسرعة دوران نجوم أخرى وسرعة انبعاث الغازات من بعض الأجرام التى تكون فى طور التكون، وأيضا لقياس سرعة المجرات الأكثر بُعدًا. غير أنه لا بد من التنويه إلى أن ذلك المنهج لا يحدد سوى سرعة الأجرام بامتداد خط النظر أمامنا. وهذا يعنى أنه لو أن جسما يتحرك بسرعة فى اتجاه عمودى على خط النظر، فلن يكون هناك مجال لتولد تأثير دوبلر وبالتالى سينتقل إلى المجال الطيفى.

ويمكن القول فى نهاية المطاف بأن التحليل الطيفى يفسح المجال للتعرف على المزيد والمزيد من المعلومات؛ ومنها على سبيل المثال أن الارتفاع النسبى لإشعاعات غاز ما يدلل على درجة تأيُّن مكوناته. ويقودنا شكل خطوط الإشعاعات إلى معلومات عن ضغط الغاز والمجال الكهربائى له ومدى الاضطراب فيه. ولو أن خطوط الإشعاع تزحزحت بصورة معيّنة فيما يسمى بتأثير زيمان، فمن شأن ذلك أن يدلنا على المجال المغناطيسى.

قياسات أخرى

فى نهاية المطاف، فإن طيف بعض الأجسام يكون له شكل خاص يسهل تعيينه، ويؤكد لنا طبيعة العمليات الفيزيائية الجارية، ومن أمثلة ذلك حالة الإشعاع السنكروتروني الناتج عن إلكترونات ذات طاقة هائلة، تتحرك فى مجال مغناطيسى، الأمر الذى يؤدى لتولُّد طيف متواصل لكن مختلف عن طيف جسم أسود.

يمكننا ملاحظة أن التحليل الطيفى يمثل أداة شديدة الفاعلية. فانطلاقًا من مجرد إشعاع ضوئى يمكننا الحصول على عدد هائل من المعلومات حول الظروف السائدة فى جرم سماوى والظواهر الفيزيائية التى تحدث به. وبفضل تلك الأداة المدهشة، فإن علم الفلك ـ الذى كان معروفًا من أكثر من قرن، ومقصورًا على دراسة بسيطة لموضع وحركة الكواكب ـ تحول إلى ما يُعرف اليوم باسم الفيزياء الفلكية، وهى دراسة الطبيعة الفيزيائية للأجرام السماوية والعمليات التى تؤثر عليها.

المِرْقَب الكاسر والمرقب العاكس (التلسكوب)

كان تطور علم الفلك، بدءا من القرن السابع عشر وحتى التسارع المدهش فى الاكتشافات بالقرن العشرين، هو قبل أى شىء ثمرة التطور المتواصل لوسائل رصد السماء. فى الواقع، فى نحو ثلاثة قرون، تطورت المعدات الفلكية بشكل مذهل. وفى حين أن مرقب جاليليو الكاسر للضوء لم يكن قطره يزيد على عدة سنتيمترات، فإن الفلكيين اليوم توجد تحت تصرفهم تلسكوبات عملاقة قد يصل قطرها لعشرة أمتار.

وفى الوقت نفسه، فإن الرصد الفلكى، الذى كان مقتصرا فى البداية على المجال المرئى، قد امتد شيئا فشيئا لكل المجالات الأخرى من موجات الراديو وحتى أشعة جاما. ولتتويج كل ذلك، فقد امتد نشاط الإنسان إلى الفضاء مع تجاوز ترسانة من الأقمار الصناعية للغلاف الجوى الأرضى لرصد السماء

بشكل أفضل، ومع وجود جيش من المركبات الفضائية يجوب المجموعة الشمسية.

المرقب الكاسر

وكانت الأداة الأولى للرصد، بخلاف العين المجردة، هى المرقب الفلكى الكاسر للضوء. يتكون ذلك المرقب من عدستين، الأولى كبيرة بما يكفى لتركيز الأشعة الضوئية القادمة من الأجرام البعيدة فى نقطة تدعى البؤرة، والأخرى أصغر، وتقوم بدور العدسة المكبرة، وتسمح بفحص الصورة متناهية الصغر للجسم والتى تكونت فى البؤرة. وكانت فائدة تلك الأداة مزدوجة. أولاً، يوفر المرقب الكاسر صورة مكبرة للجرم السماوى بفضل العدستين فى الرصد، الأمر الذى يسمح بالتالى برصد الكواكب أو السُدُم بالتفصيل، وبتوضيح الخصائص غير المرئية بالعين المجردة. وبفضل ذلك نجح جاليليو، وهو أول فلكى يستخدم المرقب الكاسر، فى القيام بالعديد من الاكتشافات من تضاريس القمر وحتى الأقمار التابعة لكوكب المشترى.

أما الفائدة الثانية للمرقب الكاسر فهى تجميع قدر من الضوء أكبر مما تجمعه العين، كلما زاد قطر العدسة السميكة زادت كمية الضوء التى يمكن الحصول عليها. وكلما زاد هذا القطر، كانت الصور أكثر لمعانا، لاسيما فيما يخص الأجرام ضئيلة الإضاءة بالشكل الذى لا يسمح للعين برؤيتها فإنها تصبح مرئية بسهولة. وبفضل ذلك التأثير الثانى، نجح جاليليو، بتوجيه مرقبه لدرب التبانة، فى أن يكتشف للمرة الأولى عددا لا يُحصى من النجوم لم تكن قد رُصدت من قبل.

وما إن تجلت فائدة المرقب الكاسر، حتى عكف المتخصصون على العمل على تكبير قطره بهدف زيادة نقائه الزاوىّ، وزيادة القدرة على رصد تفاصيل دقيقة، وقدرته على تجميع كمية كبيرة من الضوء. ولم يكن أكبر مرقب لجاليليو يزيد قطره على خمسة سنتيمترات. لكن التقدم التقنى فى صناعة العدسات أتاح إنشاء معدات أكبر. ونسوق على سبيل المثال مرقب مرصد (دوربا) فى أستونيا الذى يبلغ قطره أربعة وعشرين سنتيمترًا والذى تم إنشاؤه عام

١٨٢٤، أو المرقب ذا الثمانية والثلاثين سنتيمترًا فى عام ١٨٤٧ فى كمبريدج بالولايات المتحدة. وتوالى تشييد المَراقب الأكبر حجما فى نهاية القرن التاسع عشر؛ حيث بلغ القطر ثلاثة وثمانين سنتيمترًا فى مرصد (مودن) فى عام ١٨٨٩، ثم وصل إلى متر فى مرصد (يُرْك) فى عام ١٨٩٧.

غير أن التطور توقف عند تلك النقطة لأنه اصطدم بالإمكانات التكنولوجية وبالصعاب التى ما كان يمكن التغلب عليها فى ذلك الحين، وفى مقدمتها إن تلك العدسات العملاقة كانت تتعرض لبعض الخلل تحت تأثير وزنها، وهو ما كان يؤثر بشدة على جودة صورتها. وفضلا عن ذلك، فقد كان من الصعب الحصول على كتل زجاجية كبيرة الحجم بالدرجة المنشودة من النقاء. وبسبب تلك الصعوبات، اقتضت الرغبة فى معدات عَملاقة، التحول من المرقب الكاسر أو المنظار إلى المرقب العاكس أو التلسكوب.

المرقب العاكس (التلسكوب)

وعلى خلاف المرقب الكاسر للضوء، فإن التلسكوب لا يعتمد على عدسات كبيرة لتجميع الضوء، لكنه يستخدم مرآة كبيرة ذات شكل كُرِّى، تعكس الأشعة الضوئية وترسلها لنقطة واحدة تدعَى البؤرة. وتكمن فائدة التلسكوب فى أن المرآة يسهل التعامل معها عن العدسة، وهو ما يسمح ببلوغ أحجام أكبر، تفوق المتر بكثير، دون تشوه فى الصورة.

وقد تم تطوير المراقب العاكسة الأولى فى النصف الثانى من القرن السابع عشر، لاسيما عن طريق إسحق نيوتن. وفى هذا المجال أيضا أتاح التقدم التقنى تحقيق طفرة سريعة فى حجم المَرَايا. يمكننا بشكل خاص الإشارة إلى المرقب (١,٢٢ متر) الذى شيده فى عام ١٧٨٩ ويليام هرشل، والمرقب الذى أنشأه لورد روس فى عام ١٨٤٥ بمرآة يبلغ قطرها (١,٨٣) متر. وشهد القرن العشرون فى نهاية المطاف تشييد مراقب عاكسة عملاقة، حيث تم إنشاء أولها فى عام ١٩١٨ فى جبل (ويلسون) بكاليفورنيا بمرآة يبلغ قطرها (٢,٥٤) متر. ثم التلسكوب (هالى) الذى يبلغ قطره (٥,٠٨) متر، والذى شُيِّد على قمة جبل (بالومار) فى عام ١٩٤٩.

وبلا شك، فقد كان من شأن مرايا بمثل هذا الحجم، مثل حال العدسات العملاقة، أن تتعرض لشىء من الانبعاج بفعل وزنها الكبير. ومن منطلق السعى إلى استكمال المسيرة الاستكشافية فقد اقتضت الضرورة بدءا من ثمانينيات القرن العشرين، البحث عن تقنيات جديدة. وكان الحل الأول يتمثل فى استخدام مجموعة من المرايا الصغيرة المنفصلة، بدلا من الاعتماد على كتلة كبيرة واحدة. وتم استخدام ذلك المنهج، على سبيل المثال، فى المرقبين (كيك) الموجودين على قمة بركان (ماونا كيا) بهاواى، حيث إن مرآة كل مرقب منهما هى فى الواقع مزيج من ست وثلاثين مرآة قطر كل منها (١,٨٠) مترًا، بما يوازى مرآة بقطر عشرة أمتار.

أما الحل الآخر فقد كان يتمثل فى تشييد مرايا كبيرة الحجم لكن سمكها قليل للغاية. مثل حالة التلسكوب التقنى الجديد بالمرصد الأوروبى الأسترالى فى سيلا فى شيلى، والذى يتضمن مرآة يبلغ قطرها (٣,٥) متر. غير أن سُمك المرآة الضئيل أضعف صلابتها وجعلها قابلة للانبعاج بسهولة. وللتغلب على ذلك العيب والحفاظ على أبعادها وشكلها الهندسى الأصلى، فقد تم تزويد المرآة بنظام دعامات يتكون من مجموعة من المكابس خلف المرآة تعمل على معالجة أى خلل لتحتفظ بكل خصائصها الأصلية.

النقاء الزَّاوِىّ المرتفع

لقد أتاحت زيادة أحجام التلسكوبات خلال قرون تحقيق زيادة ضخمة فى القدرة على تجميع الضوء، وبالتالى فى رصد أجرام أضعف ضوءًا. غير أن تلك الزيادة لم تكن مصحوبة بتقدم مماثل فى النقاء الزاوى للتلسكوبات؛ أى فى قدرتها على رصد تفاصيل أكثر دقة.

التغلب على الاضطرابات الجوية

ويُعزى السبب فى عدم تحقيق التقدم المنشود إلى ظروف الغلاف الجوى الأرضى، فذلك الغلاف فى الواقع يتسم بنشاط مستمر بسبب انتقال كتل الهواء

التى تولِّد ما نطلق عليه اسم الاضطرابات الجوية. والنتيجة الرئيسة لتلك الظاهرة هى الانحراف المتواصل والعشوائى للأشعة الضوئية التى تصلنا من الفضاء. ولعل أبرز مثال على ذلك هو أن هذه الاضطرابات الجوية هى التى تُشْعرنا بالتألق المعروف للنجوم.

وبالنسبة للفلكى الذى يحاول التقاط صورة لجرم سماوى ما، فإن الاضطرابات الجوية تؤدى إلى عدم وضوح الصورة ومعالمها وبالتالى عدم القدرة على رؤية التفاصيل الصغيرة. على سبيل المثال، فإن صورة نجم ما بدلا من أن تكون واضحة المعالم، فإنها تكون أقرب شبها ببقعة كبيرة. الاضطرابات الجوية إذن تَحُول دون بلوغ التلسكوبات الكبرى نقاءها الزَّاوِىّ النظرى. ويدلل على ذلك أن مرقب جبل (بالومار)، على الرغم من قطره البالغ خمسة أمتار وقدرته الهائلة على تجميع الضوء، لا يزيد فى نقائه الزاوى على تلسكوب ذى قطر لا يزيد على سنتيمترات عشرة.

لقد سعى الفلكيون منذ بداية القرن العشرين إلى التغلب، أو على الأقل تقليل الآثار الضارة للاضطرابات الجوية. وكان الحل الأول لتلك المشكلة يتمثل فى محاولة تقليل مسار الضوء فى الغلاف الجوى، وذلك بإنشاء مراصد على ارتفاعٍ عالٍ. ولذلك نجد كل المَراقب الحديثة موجودة على قمم الجبال أو البراكين. فهناك على سبيل المثال المراقب على قمة بركان (ماونا كيا) على ارتفاع أربعة آلاف ومائتَىْ متر فى جزر هاواى ومراقب المرصد الأوروبى الأسترالى (إسو) على ارتفاع ألفين وأربعمائة متر فى شيلى، أو مراقب (لابالما) فى جزر الكنارى، وهى أيضًا على ارتفاع ألفين وأربعمائة متر. إن الصور الملتقطة من تلك المواقع الجبلية أكثر وضوحا وأفضل فى النقاء الزاوى بنسبة اثنين أو ثلاثة أمثال.

التطورات الحديثة

لكن حتى فى المواقع المرتفعة، فإن آثار الاضطرابات الجوية تكون أيضًا ذات تأثير كبير. ولعل الوسيلة الأفضل لتجاوز تلك الآثار هى وضع المرقب فى مدار حول الأرض، على مسافة ينعدم فيها تأثير الغلاف الجوى. وقد تحقق

ذلك فى نهاية المطاف عام ١٩٩٠ حين نقل مكوك فضائى أمريكى المرقب الفضائى هابل، بمرآة يبلغ قطرها (٢,٤) متر، إلى مدار على ارتفاع ستمائة كيلومتر. وبالابتعاد عن الغلاف الجوى، يكون المرقب الفضائى قادرا على بلوغ نقاء زاوى نظرى بقدر حجمه، وبالتالى يتفوق على كل المراقب الأرضية. إنه يلتقط الآن صورًا بالغة الدقة والوضوح، مع إظهار تفاصيل تكون أحيانا أدق عشر مرات قياسا بالتلسكوبات الأرضية. فضلا عن ذلك، فإن ذلك التفوق فى النقاء مصحوب بتفوق فى درجة وضوح الصورة؛ الأمر الذى يتيح رصد أجرام ذات إضاءة أكثر ضعفًا. وقد أتاحت الإمكانات المدهشة للمرقب الفضائى حدوث نقلة كبرى فى كل مجالات علم الفلك، من دراسة المجموعة الشمسية وحتى علم الكونيات.

وبينما كان التلسكوب الفضائى يحقق المزيد والمزيد من النجاحات، لم تقف المراقب الأرضية مكتوفة الأيدى. فقد شهدت التسعينيات فى الواقع تطور تقنية جديدة تدعى العدسة المتكيفة وتسمح للمراقب الأرضية بتغلب جزئى على المشكلات المتعلقة بالاضطرابات الجوية. إنها منظومة من العدسات المتكيفة تحلل الضوء القادم من الجرم السماوى محل الدراسة، لتحديد الطريقة التى تأذت بها الأشعة الضوئية القادمة منه بسبب المرور عبر الغلاف الجوى. ثم يتم استخدام هذه المعلومات لإدخال تعديلات فى شكل مرآة لينة وقابلة للتشكيل، بمعدل مائة مرة فى الثانية. وتسمح تلك التغيرات فى الشكل بمعاوضة الاضطرابات الجوية، بحيث يكون الضوء المنعكس وكأنه لم يمر بأى اضطرابات جوية على الإطلاق. وتم استخدام تلك التقنية بالفعل بنجاح فى عدة مراقب كبرى؛ ومنها مرقب المرصد الأوروبى الأسترالى (إسو) بشيلى.

علم الفلك الرّاديوىّ

إن الضوء المرئى هو مجال محبب للإنسان، بيد أنه لا يمثل إلا كسرًا ضئيلاً من الطيف الكهرومغناطيسى. ويمكن للمجالات الأخرى للأطوال الموجية أن توفر لنا كمية غير معقولة من المعلومات حول الكون.

بلا شك، لكى نكون قادرين على تحليل تلك المعلومات، ينبغى أولاً إنشاء أدوات قادرة على اكتشاف الإشعاعات محل التساؤل، وهو ما يفسر أن علم الفلك غير المرئى لم يتطور إلا فى منتصف القرن العشرين.

كانت موجات الراديو هى المجال الأول للأطوال الموجية غير المرئية التى أمكن استغلالها. وقد أجرى الرواد فى ذلك المجال عدة عمليات للرصد فى الثلاثينيات، لكن لم يتطور علم الفلك الراديوى بحق إلا بعد الحرب العالمية الثانية. فقد صار، منذ ذلك الحين، أحد ركائز علم الفلك الحديث. وقد أتاح بشكل خاص اكتشاف بعض الأجرام الأكثر أهمية بالكون مثل نجوم البلسار والمَجرَّات الراديوية أو الكوازارات. وقد فتح كذلك الطريق لدراسة مختلف أنواع سُحُب الهيدروجين المنتشرة فى الوسط بين النجمى والتى تتولد منها النجوم.

وبالمقارنة مع الأضواء الأخرى، فإن موجات الراديو تتميز بأطوال موجية كبيرة. وكان من الضرورى لهذا السبب اللجوء لهوائيات كبرى تدعى المراقب الراديوية. ومن أمثلتها الأكثر شهرة يمكننا ذكر المرقب الراديوى (إيفلسبرج) بألمانيا، وهو الهوائى الهائل على هيئة قِطْع مكافئ بقطر مائة متر، أو المرقب الراديوى فى (أرسيبو) فى بورتوريكو والذى تم إنشاؤه باستغلال تجويف طبيعى، يبلغ قطره ثلاثمائة متر، وتم تبطينه بألواح من الألومنيوم.

غير أن إحدى المشكلات الكبرى لعلم الفلك الراديوى تتمثل فى الضعف الشديد فى درجة النقاء الزاوى، حتى مع مراقب يبلغ قطرها عدة مئات من الأمتار. وقد يكون الحل الأكثر بساطة هو زيادة حجم تلك الأدوات، لكن بلا شك فإنه من غير الوارد إنشاء مراقب راديوية يبلغ قطرها كيلومترًا أو أكثر. وتغلب علماء الفلك الراديوى على تلك المشكلة بإنشاء شبكات متداخلة مكونة من عدة مراقب راديوية منفصلة بعضها عن البعض. لو أننا جمعنا إشارات مختلف المراقب التى ترصد فى وقت واحد الجرم ذاته، فإنه من الممكن الحصول على العديد من المعلومات حول هذا الجرم، بل وحتى تكوين صورة له. وهكذا ترتهن درجة النقاء الزاوى لتلك الصورة بالحجم الكلى للشبكة وليس بحجم مرقب واحد، ومن هنا تأتى إمكانية رؤية تفاصيل شديدة الدقة.

ومن الشبكات الأكثر شهرة فى هذا المجال المرقب "VLA" فى المكسيك الجديدة، وهو عبارة عن شبكة مكونة من سبعة وعشرين هوائيًا متحركًا، موزعة على منطقة بطول عشرين كيلومترًا؛ والمرقب "VLBA" وهو شبكة من عشرة هوائيات بقطر خمسة وعشرين مترًا موزعة على كل أراضى الولايات المتحدة، وبالتالى فإن المسافة القصوى بين هوائيين تكون ثمانية آلاف كيلومتر، وهو ما يسمح بالحصول على درجة نقاء زاوى أفضل بألف مرة من المراقب الأرضية المنوطة بالرصد البصرى. فى النهاية، فإن أفضل نتائج تم الحصول عليها عند استخدام شبكة من المراقب الراديوية الموزعة على عدة قارات. يدعى ذلك المنهج "VLBI". وقد تم اختباره لأول مرة فى عام ١٩٦٧، وأتاح بلوغ درجة نقاء زاوى أعلى عشرة آلاف مرة من نقاء المراقب البصرية الأرضية، وهو رقم قياسى بالنسبة لكل الأطوال الموجية مجتمعة.

الأطوال الموجية الأخرى

انطلق تطور علم الفلك الراديوى فور نهاية الحرب، لأن عمليات الرصد كانت تتم من الأرض مثل حال الرصد فى المجال المرئى. لكن لم يكن ذلك الحال ينطبق على مناطق الطيف الكهرومغناطيسى الأخرى، أى فى نطاقات الأشعة تحت الحمراء وفوق البنفسجية وأشعة إكس أو أشعة جاما. فى الواقع، فإن بعض مكونات الغلاف الجوى، وبوجه خاص بخار المياه والغاز الكربونى والأوزون، تمتص الموجات الكهرومغناطيسية فى هذه النطاقات وتمنعها من بلوغ سطح الأرض. والوسيلة الوحيدة لدراسة السماء فى إطار تلك الأضواء هى بالتالى استخدام أدوات على ارتفاعٍ عالٍ مثل المنطاد أو الطائرة، أو الأفضل باستخدام أقمار صناعية فى مدار حول الأرض.

الأشعة تحت الحمراء

وكان القمر الصناعى الأول للرصد فى مجال الأشعة تحت الحمراء هو IRAS (إيراس) وتم إطلاقه فى عام ١٩٨٣ بالتعاون بين الأمريكيين

والبريطانيين والنرويجيين. وهو مزود بمرقب يبلغ قطره (٥٧) سنتيمترًا، تمكن على مدى عشرة شهور من الرصد من مسح كل مجالات علم الفلك. فقد قدم بوجه خاص خريطة كاملة للسماء فى نطاق الأشعة تحت الحمراء وكشف عدة مُذنَّبات، وقام برصد سحب الغبار بين النجمية والتى تمت تسميتها بالسحب الصوفية تحت الحمراء. وكشف وجود أطواق من الغبار حول العديد من النجوم، وكشف عن وجود نوع جديد من المجرات. لقد كان نجاحا عظيما.

وفى عام ١٩٩٥، أطلقت الوكالة الفضائية الأوروبية قمرها الخاص للرصد فى مجال الأشعة تحت الحمراء ISO (إيزو) لفترة رصد امتدت لعامين ونصف العام. وتمكن (إيزو) من اكتشاف إشعاعات تحت الحمراء فى أطوال موجية تقع بين (٢,٥) و(٢٤٠) ميكرومترًا بدرجات حساسية ونقاء زاوى أكبر قياسًا بنتائج (إيراس). ومن بين إنجازاته رصد العديد من مناطق نشأة النجوم فى مناطق قريبة أو فى مجرات بعيدة، وكذلك اكتشاف بخار المياه فى القمر تَيْتان، وبشكل أكثر عمومية اكتشاف وجود ماء فى أماكن كثيرة فى أنحاء الكون.

الأشعة فوق البنفسجية

فى مجال الأشعة فوق البنفسجية أُطلقت الأقمار الصناعية الأولى للرصد فى نطاقاتها، فى الستينيات والسبعينيات. وكان أهمها القمر IUE (آى يو إى) الذى أطلق فى عام ١٩٧٨ واستمر يعمل لمدة ثمانية عشر عاما، وكان مزودا بمرقب يبلغ قطره (٤٥) سنتيمترا ونجح فى تحقيق إنجاز استثنائى بتوفير حزمة من المعلومات تتركز بشكل خاص على النجوم الأكثر سخونة وما تطلقه من غازات، وكذلك الوسط بين النجمى والكوازارات. ولاستكشاف الإشعاعات فوق البنفسجية البعيدة قرب الحدود مع نطاق أشعة إكس، أطلق الأمريكيون EUVE (إى يو فى إى) الذى قام برصد السماء من عام ١٩٩٢ وحتى عام ٢٠٠١. وتمكن ذلك القمر من تقديم خريطة للسماء واكتشاف المصدر الأول فوق المَجرِّى فى نطاق الأشعة فوق البنفسجية، وقام بدراسة بعض النجوم الخاصة مثل المتقزمات البيضاء.

أشعة إكس

وفى مجال أشعة إكس، كان القمر UHURU (أوهورو) هو القمر الصناعى الرائد. وأُطلق عام ١٩٧٠، وقدم خريطة للسماء واكتشف العديد من المصادر اللامعة. وفى نهاية السبعينيات، أطلقت ثلاثة أقمار من سلسلة HEAO (هياو) وواصلت العمل فى ذلك المجال ولكن بشكل أكثر عمقا، وكشفت أكثر من عشرة آلاف مصدر لأشعة إكس. ومنذ ذلك الوقت، كشفت دراسة تلك المصادر أنَ الأمر يتعلق بشكل أساسى بازدواجات نجمية خاضعة لظواهر شديدة العنف وبقايا انفجارات نجمية سوبرنوفا أو تجمعات مَجَرِّية. وقد واصلت أقمار أخرى منذ ذلك الوقت ذلك النوع من الرصد، وبشكل خاص القمر الأوروبى EXOSAT (إكزوسات) والقمر الألمانى ROSAT (روزات) بالترتيب فى عام ١٩٨٣ وعام ١٩٩٠، ثم القمر الأمريكى CHANDRA (شاندرا) والقمر الأوروبى XMM-NEWTON (إكس إم إم نيوتن) والذى تم إطلاقهما فى عام ١٩٩٩.

أشعة جاما

وننتقل فى نهاية المطاف لنطاق أشعة جاما الذى يتناول الظواهر الأكثر عنفا فى الكون، والتى تحدث حول النجوم النبَّاضة أو الطارقة وفى الوسط بين النجمى أو فى مراكز المجرات أو فى الكوازارات. لقد تم إطلاق الأقمار الأولى للرصد فى ذلك النطاق فى نهاية الستينيات. ومن الأقمار الصناعية الرئيسة التى أُطلقت منذ ذلك الحين، القمر الأوروبى COS-B (كوس بى)، الذى تم إطلاقه فى عام ١٩٧٥، والقمر الفرنسى الروسى GRANAT (جرانات) الذى أطلق فى عام ١٩٨٩، والقمر الأمريكى GRO (كمبتون جرو) الذى أطلق فى عام ١٩٩١. أما الدراسات الأكثر أهمية فى الوقت الحالى، فهى التى تجرى عن طريق القمر الشامل للوكالة الفضائية الأوروبية الذى أطلق عام ٢٠٠٢.

وفضلاً عن وضع أقمار صناعية فى مدارات للرصد فى كل الأطوال الموجية، فقد تميز الجزء الثانى من القرن العشرين بشكل واضح باستخدام

المركبات الفضائية الآلية لاستكشاف المجموعة الشمسية، علاوة على الخطوات الأولى للإنسان على القمر.

[٣]

المجموعة الشمسية الداخلية

نشأة المجموعة الشمسية

ينبغى لأى نموذج لتفسير نشأة المجموعة الشمسية أن يتيح تفسير الحالة الحالية لها. وقبل أن نرى كيف تشكلت المجموعة الشمسية، فلنقُم بجولة سريعة لرؤية بعضٍ من خصائصها.

تضم المجموعة الشمسية ثمانية كواكب كبيرة. ويمكن تقسيم تلك الكواكب لمجموعتين؛ الكواكب الأرضية ذات الحجم الصغير والكتلة الصغيرة والكثافة العالية، وهى عطارد والزهرة والأرض والمريخ. والمتعملقات الغازية ذات الحجم الكبير والكتلة الكبيرة والكثافة القليلة، وهى المشترى وزحل وأورانوس ونبتون. وتبدو مدارات الكواكب حول الشمس وكأنها تقع فى مستوى واحد يعرف بالفلك البروجى، وبالتالى فإن المجموعة الشمسية من الخارج تبدو مسطحة للغاية. ولهذا السبب بالتحديد، تبدو الكواكب بالنسبة للراصد الأرضى وكأنها تتحرك فى دائرة ضيقة للغاية من السماء تدعى دائرة البروج.

ويُعد توزيع العزم الزاوى خاصية مهمة لهذا النظام، وتكتسب تلك الخاصية أهميتها من أنها حتمية بالنسبة لنماذج النشأة، وتتعلق هذه الخاصية بدوران جسم ما ويمكن تحديد قيمتها بعلاقة تربط بين الكتلة وسرعة الانتقال الزاوى والمسافة من محور الدوران. وتقول النظرية بأن مقدار العزم الزاوى لنظام

معزول يجب أن يكون ثابتا بالنسبة للزمن. وهذا يعنى أن العزم الزاوى للنظام الشمسى إبان نشأته مطابق لما يمكننا قياسه حاليًا. بالمقابل، فإن توزيع العزم بين الشمس والكواكب من الوارد تماما أن يكون قد تغير. فحاليا، فى حين أن الشمس تستحوذ وحدها على تسعٍ وتسعين بالمائة من الكتلة الكلية للمجموعة الشمسية، فإنها لا تستحوذ إلا على ثلاثة بالمائة من العزم الزاوى الإجمالى للمجموعة. ويعد ذلك أمرًا شديد الأهمية لاستبعاد نظريات النشأة شديدة التبسيط وغير القادرة على تفسير التوزيع الحالى.

فلننتقل الآن إلى تاريخ نشأة المجموعة الشمسية. يعد الوصف التالى نموذجا مقبولا بشكل عام، حتى لو كانت تفاصيله ما زالت تمثل محلا لمناقشات عديدة. بداية، منذ ما يقرب من عشرة مليارات من الأعوام، لم يكن ما صار فيما بعد المجموعة الشمسية سوى جزء صغير من سحابة عملاقة من الهيدروجين والهليوم تواصل دورانها حول المركز المجرى. ومع مرور الوقت، كانت تلك السحابة تنكمش ببطء وتزداد ثراء بالعناصر الثقيلة إبان تفجر نجوم كبيرة قريبة، وهو ما يفسر الوفرة الحالية فى تلك العناصر، والتى تصل لنسبة اثنين بالمائة. وفى النهاية، ومنذ (٤,٦) مليار من الأعوام، وتحت تأثير جاذبيتها الخاصة، انهارت تلك السحابة على نفسها وتفتَّتت إلى سلسلة من السحب ذات الحجم الأقل، والتى شكلت واحدة منها مجموعتنا الشمسية.

واستمرت المجموعة الشمسية الجديدة التى بدأت فى التبلور فى الانكماش شيئا فشيئا. لكن وفقا لقانون حفظ العزم الزاوى لو أن حجم جسم ما قل، لا بد أن تزيد سرعة دورانه لمعاوضة ذلك النقص. لقد كان انكماش المنظومة الوليدة مصحوبا إذن بزيادة كبيرة فى سرعة الدوران. وبما أن النظام الوليد لم يكن متماسكا بعد، فقد اتسم بتسطُّح فى المستوى العمودى على محور الدوران. إننا نجد أنفسنا بهذا الشكل أمام تركيز كبير للمادة فى المركز، حيث يوجد النجم الوليد وهو محاط بقرص من المادة يدعى قرص الكواكب الأولى.

وهنا يأتى دور معرفتنا بمفهوم توزيع العزم الزاوى. فالنماذج المطروحة الأكثر بساطة لنشأة الكون تقول بأن المجموعة الشمسية هى نتاج مجرد

انكماش سحابة غازية فى حالة دوران. لكن ذلك التفسير ينبغى أن يسفر عن سرعة معينة لدوران الشمس؛ غير أن هذه السرعة لا تتوافق مع واقع أنها لا تملك سوى ثلاثة بالمائة من العزم الزاوى الإجمالى.

لكن يبدو فى الواقع أن الشمس الناشئة حديثا تعرضت تحت تأثير القوى المغناطيسية لإبطاء سرعتها. ففى الظروف الفيزيائية السائدة فى تلك الحقبة، كان التغير فى المجال المغناطيسى يؤدى تلقائيا لتغير فى توزيع المادة وبالعكس ـ ويقال إن خطوط المجال المغناطيسى تبدو مجمدة فى المادة. بالتالى فإن خطوط المجال المغناطيسى التى تخترق المجموعة الشمسية الناشئة تبدو قابلة للتغير، لكن فقط بقدر محدود. وانتقلت تلك الصلابة إلى المادة، وهو ما أوجد صلة بين الشمس الأولية وقرص الكواكب. وبفضل تلك الرابطة، فقد كبحت المنطقة المركزية وفقدت شيئًا فشيئًا عزمها الزاوى لصالح القرص المحيط بها والذى أخذ يدور بسرعة متزايدة.

وتحت تأثير التباطؤ، انخفضت قوة الطرد المركزية للشمس. إلى أن توقف فى نهاية الأمر انطلاق المادة من النجم الوليد. ومن ذلك الوقت، بدأ كل من النظامين الوليدين اللذين كانا مرتبطين فى أن يتطورا بشكل مستقل. فى المركز، استمرت الشمس الناشئة فى الانكماش مع ازدياد حرارتها سريعًا. لتبدأ مع الوقت التفاعلات النووية الاندماجية، وهى التى أدت إلى تبلور ذلك النجم الذى نعرفه اليوم.

نشأة الكواكب

فى قرص الكواكب الأوَّلى، كانت الذرات تتجمع عند التقائها لتتحول إلى غبار. وتجمع ذلك الغبار بدوره ليشكل أجسامًا صغيرة هى كواكب أولية. واستمرت تلك المرحلة لعدة ملايين من السنوات. ونتيجة التخلخلات فى القرص، ظهرت تقلبات فى الكثافة وتطورت إلى أن أسفرت عن تكوُّن أجسام ذات حجم كبير. وتعرف هذه العملية بالتضخم الجرمى. واستمرت تلك الأجسام

فى ضم المزيد والمزيد من الجسيمات حتى وصلت لدرجة الكواكب. ولقد انتهى الطور الرئيس لذلك التضخم الجرمى منذ نحو (٤,٤) مليار عام حتى لو كان ثمة اصطدامات حادة استمرت لمليار عامٍ تالٍ.

ويرتهن المظهر النهائى للكواكب ببعدها عن الشمس. فبالقرب منها، تتلقى العناصر الخفيفة الكثير من الطاقة، وتكون ساخنة للغاية بما يكفى لكى تتكثف. وتصبح المواد الأولية التى تشكل تلك الكواكب بالتالى ثرية بالعناصر الثقيلة مثل الحديد والسلسيوم، وهو ما يفسر الكثافة الكبيرة لتلك الكواكب القريبة. وبعيدًا عن الشمس، فإن تضخم الكواكب كان مصدر وجود نواة مكثفة كانت نقطة انطلاق لنمو خارجى. وتراكم حول النواة غِلاف غازى أسفر عن تشكُّل كوكب ذى حجم هائل وكتلة كبيرة؛ ولكن بالأساس مكون من الهيدروجين وبالتالى قليل الكثافة.

نشأة الأغلفة الجوية

أحد الخصائص الأكثر إثارة للدهشة لكواكب المجموعة الشمسية هو التنوع الشديد فى تكوين أغلفتها الجوية، بدءا من الكواكب الغازية العملاقة التى يسود بها الهيدروجين والهليوم، إلى الزهرة والمريخ اللذين يتكون غلافهما الجوى بشكل رئيس من ثانى أكسيد الكربون، مرورا بغاز الميثان بالقمر تيتان، وبالتأكيد الحالة الخاصة للغاية للأرض ووفرة الأكسجين بها.

التكوين

ترتهن قدرة كوكب ما أو تابع ما على تكوين غلاف جوى والاحتفاظ به بالعديد من المعايير؛ فالذرات أو الجزيئات التى من شأنها تشكيل غلاف جوى عندما تتعرض للحرارة تتقلقل وتكتسب حركة بسرعة متوسطة قريبة بدرجة ما من سرعة تحرر الكواكب، أى السرعة الدنيا التى ينبغى أن يكتسبها جسم ما لكى يتمكن من الإفلات من الشد الجذبوى (والتى تُقدر بـ (١١,٢) كيلومتر فى الثانية بالنسبة لكوكب الأرض). وبما أن غلاف كوكب ما يتكون من جزيئات

لا يمكنها الفرار، يمكننا بمقارنة سرعة التحرر بحركة القلقلة الحرارية، أن نثبت أن تكوين الغلاف الجوى يرتبط بالأساس بكتلة الجسم وبحجمه وبدرجة حرارته؛ وبالتالى بمسافة بعده عن الشمس.

وفيما يخص المجموعة الشمسية، كانت هناك ثلاث حالات. أولاً الأجسام التى لم تكن ظروفها مواتية للحفاظ على غلاف جوى يذكر، بسبب ضعف كتلتها بوجه عام وبالتالى ضعف جاذبيتها. ونعنى عطارد والقمر وبلوتو وكل توابع الكواكب بالمجموعة الشمسية، باستثناء القمر تيتان. بعد ذلك، الأجسام ذات الكتلة الهائلة والقادرة على الاحتفاظ بكل أنواع الغازات، وبوجه خاص الهيدروجين والهليوم، وهى المشترى وزحل وأورانوس ونبتون. وفى نهاية المطاف، فإن الحالة الأكثر جذبا للانتباه هى حالة الكواكب أو التوابع ذات الكتلة المتوسطة، وإن كانت حرارتها منخفضة للغاية، وهى الزهرة والأرض والمريخ وتيتان. لقد فقدت تلك الأجسام الأربعة الهيدروجين والهليوم، لكنها نجحت فى الحفاظ على غازات أثقل مثل ثانى أكسيد الكربون أو بخار الماء.

وترتبط الأغلفة الجوية للزهرة والمريخ والأرض فى أصلها بنفس الظاهرة، وهى تفريغ الغازات البركانية والتى تتمثل فى تحرر الغازات التى احتُبست فى الصخور، إبان نشأة الكوكب، وذلك عن طريق التفجرات البركانية. والغازات الثلاثة الرئيسة فى تلك الحالة هى بخار الماء وثانى أكسيد الكربون وثانى أكسيد الكبريت. لكن على الرغم من أن الأغلفة الجوية الثلاثة قد نتجت عن نفس الآلية، بيد أنها سرعان ما اختلفت وتولدت عنها شروط مختلفة للغاية، حيث نجد جحيما من ثانى أكسيد الكربون بدرجة حرارة تبلغ أربعمائة وستين درجة مئوية على الزهرة، وغلافا جويا خفيفا للغاية من ثانى أكسيد الكربون على المريخ، ثم بيئة الأرض التى تتميز بوجود الحياة.

حالة فريدة: تيْتَان

وبخلاف الزهرة والأرض والمريخ والكواكب العملاقة، فإن تيتان هو آخر جسم فى المجموعة الشمسية يحتفظ بغلاف جوى ذى قيمة تذكر. يتكون هذا الغلاف بشكل رئيس من النتروجين مع نسب من الميثان. ويأتى غاز النتروجين

من تدمير جزيئات الأمونيا – تحت تأثير الأشعة فوق البنفسجية الشمسية– وهو المكون الوفير فى المناطق الخارجية بالمجموعة الشمسية. أما غاز الميثان، فإن وجوده أكثر غموضا. فذلك الغاز كان لا بد أن يختفى فى مدة لا تتجاوز عشرة ملايين من السنوات ما لم يكن يتجدد باستمرار. هناك إذن مصدر للميثان بداخل الكوكب، وذلك هو أحد موضوعات دراسة بعثة (كاسينى - هيجن).

نشأة الغلاف الجوى لكوكب الزهرة

إن العامل الأكثر تأثيرا فى تطور كوكب الزهرة مقارنة بالأرض هو اكتساب قدر أكبر من الطاقة نتيجة قربه من الشمس. فبعد طور تحرر الغازات الأولى، كان يمكن لكوكب الزهرة أن يكون مشابها لكوكبنا.

فمن المرجح أن بخار الماء تكثف بفعل الظروف السائدة وتحول إلى ماء تكونت منه محيطات، لا سيما وأنه فى تلك الحقبة لم تكن الشمس الشابة تبث سوى سبعين بالمائة من الطاقة التى تنتجها الآن. ومن المرجح أن درجة الحرارة فى ذلك الوقت كانت تتجاوز المائة درجة مئوية، لكن الضغط الجوى الأكبر منه على كوكبنا، جعل الماء يستمر على هيئته السائلة. وكان من المفترض كذلك وجود ثانى أكسيد الكربون فى الغلاف الجوى للزهرة، لكن بكميات محدودة لأن الأمطار والمحيطات كان من شأنها إذابته ومزجه بالصخور الترسيبية.

لكن مع الوقت، أخذت طاقة الشمس تزداد. وبعد مئات الملايين من السنين، بلغت درجة الحرارة على سطح الزهرة ثلاثمائة وأربعًا وسبعين درجة، وهو الحد الذى لا يمكن للمياه بعده أن تستمر على هيئة سائلة، وبدأت المحيطات فى التبخر. ومع وصول كميات كبيرة من بخار المياه للغلاف الجوى، بدأت ظاهرة جديدة تأخذ مجراها وهى تأثير الصُوَب.

حين تبلغ أشعة الشمس كوكبا مثل الزهرة أو الأرض، فإنها تتركز بشكل أساسى فى النطاق المرئى، الذى ينفذ بسهولة فى الغلاف الجوى. ومن ثَم تبلغ

طاقة تلك الأشعة سطح الكوكب دون عوائق. ويتم حينذاك امتصاص تلك الطاقة عبر الكوكب ثم ترتد بشكل تلقائى إلى الخارج. لكن لما كان الكوكب أبرد كثيرا من الشمس، فإن الإشعاع المرتد يكون متركزا فى نطاق الأشعة تحت الحمراء بدلا من النطاق المرئى. لكن بخار الماء وثانى أكسيد الكربون لا تنفذ خلالهما الأشعة تحت الحمراء. وبالتالى تمتص تلك الغازات الأشعة المرتدة من الكوكب التى تعمل على زيادة درجة حرارتها. إنه تأثير الصوب. ولقد أدت تلك الظاهرة الجديدة على كوكب الزهرة إلى زيادة فى درجة حرارة الغلاف الجوى، وأسهمت فى تعجيل تبخر المحيطات، وهو ما أدى مرة أخرى إلى تضخيم تأثير الصوب، واستمر الحال على هذا المنوال بشكل تصاعدى إلى أن حدثت الضربة القاضية بالنسبة لكوكب الزهرة، حين تبخرت المحيطات بشكل كامل. فبدون مياه سائلة لإذابة ثانى أكسيد الكربون والكبريت، فإن تلك الغازات بدأت كذلك فى التراكم فى الغلاف الجوى والمساهمة فى تأثير الصوب. وبلغت درجة الحرارة فى نهاية المطاف مستوًى أتاح لثانى أكسيد الكربون الحبيس فى الصخور التحرر والانطلاق إلى الغلاف الجوى.

لقد كانت نتيجة ذلك التطور هى الجحيم الذى نرصده حاليا، حيث نرى غلافا جويا يهيمن عليه ثانى أكسيد الكربون، بدرجة حرارة أربعمائة وستين درجة مئوية. وتلك الحرارة مستقرة حاليا لأن الحلقة التصاعدية انقطعت. لقد أذابت الأشعة فوق البنفسجية الشمسية شيئا فشيئا جزيئات المياه وحللتها إلى مكوناتها، وهى ذرات الأكسجين والهيدروجين التى أفلتت إلى وسط ما بين الكواكب. وبما أن تأثير الصوب كان يُعزى بالأساس لبخار المياه، فقد صار بعد ذلك مستقرا، لكن تلك المياه سوف تتحلل فورا عن طريق الأشعة فوق البنفسجية للشمس، لتتَّحد مكوناتها مع ثانى أكسيد الكبريت لتشكل سحبا من الحَمْض الكبريتى. وقد يكون من الوارد أن تؤدى الأنشطة البركانية إلى انطلاق كميات من الماء.

الغلاف الجوى للأرض والمريخ

الأرض

لقد عرفت الأرض، بسبب مدارها الأبعد عن الشمس من مدار الزهرة، تطورا مختلفا تماما. رغم أن الغلاف الجوى للكوكبين كان فى الأصل على الأرجح شديد التشابه، وكان مكونا بشكل أساسى من بخار المياه. ومثلما حدث فى كوكب الزهرة، أدى تبريد الكوكب بعد نشأته إلى تكوُّن المحيطات. لكن بسبب المسافة الأبعد من الشمس، وبالتالى الحرارة الأقل، لم تكن تلك المحيطات مهددة بالتبخر. بالعكس، ولاسيما أن الشمس كانت أضعف منها اليوم، فقد كان كوكبنا معرضا لخطر أن يتجمد ويتحول لعالم جليدى لا يمكن أن يشهد نشأة حياة.

ولحسن حظنا، أن الغلاف الجوى كان يحتوى كذلك على ثانى أكسيد الكربون، وهو المركب القادر على البقاء فى هيئة غازية فى درجات حرارة أضعف لبخار المياه. لقد أدى وجود ثانى أكسيد الكربون بكميات أكبر منه فى أيامنا لنشأة تأثير الصوب، الذى سمح للأرض بالحفاظ على حرارة كافية لكى تظل المحيطات فى الحالة السائلة.

ومع الوقت، زادت قوة الشمس حتى المستوى الحالى، ووفرت حرارة معتدلة لكوكبنا. وبشكل مُوازٍ، جرفت الأمطار شيئا فشيئا الجزء الأكبر من ثانى أكسيد الكربون، وذاب فى المحيطات وأصبح حبيس الصخور الترسيبية فى أعماق المحيطات. وفى أيامنا، لا زال ثانى أكسيد الكربون الباقى فى الغلاف الجوى يسهم فى زيادة الحرارة بنحو أربعين درجة مئوية.

وتأثر الغلاف الجوى الأرضى بعد ذلك بظاهرة جديدة هى نشأة الحياة، وبشكل خاص بحدوث عملية التمثيل الضوئى، التى تحول من خلالها بعض الخلايا الإشعاع الشمسى لطاقة كيميائية، باستهلاك ثانى أكسيد الكربون وبث الأكسجين. وبدأ ذلك الأخير يشكل أثرا ملحوظا على الغلاف الجوى منذ نحو مليارَىْ سنة. وبفضله، ظهر نوع جديد من المواد العضوية مستندا هذه المرة

على عملية التنفس، وهى العملية التى تنتج بفضلها الحيوانات الطاقة، لكن هذه المرة باستهلاك الأكسجين ولفظ ثانى أكسيد الكربون.

وتبلغ نسبة الأكسجين اليوم نحو واحد وعشرين بالمائة، وهى نسبة تدلل على التوازن بين التمثيل الضوئى والتنفس. ويتكون الجزء الباقى من الغلاف الجوى فى المقام الأول من النتروجين الراجع هو الآخر لنشأة الحياة، حيث يأتى فى الواقع من البكتريا القادرة على الحصول على الأكسجين من نوع من الصخور تُسمى (النترات)، وهى عملية تؤدى إلى تحرر النتروجين.

المريخ

أما التطور الماضى للمرِّيخ، فإنه محاط بكثير من اللبس مقارنة بالأرض. تفيد النظرية الأكثر شيوعا، أن الغلاف الجوى المريخى قد يكون نشأ فى ظروف مشابهة مع تحرر كميات كبيرة من بخار المياه وثانى أكسيد الكربون. وتحت تأثير الصوب الناجم عن تلك الغازات، ارتفعت الحرارة على الأرجح بصورة كافية لكى تتوافر المياه فى حالة سائلة لفترة زمنية طويلة للغاية، بل وحتى لكى تظهر حياة.

ويأتى الاختلاف بين المريخ والأرض بالأساس من واقع أن المريخ هو جسم أصغر من الأرض (حيث تبلغ كتلته عُشْر كتلة الأرض). وكانت نتيجة ذلك أن الكوكب الأحمر بعد نشأته، كان يضم كمية من الحرارة الداخلية أضعف نسبيا، وبالتالى فقد برد بشكل أسرع. وتوقف لهذا السبب النشاط الجيولوجى فى وقت مبكر من تاريخ المريخ. ونتيجة انعدام الأنشطة البركانية العنيفة، لم يكن للكوكب من سبيل لإعادة ضخ ثانى أكسيد الكربون الحبيس فى الصخور، إلى الغلاف الجوى. ومع الوقت، ونتيجة عدم وجود ما يعوق عملية امتصاص الغاز، أخذت تزداد كمية ثانى أكسيد الكربون الجوى الحبيسة فى الصخور.

وكانت النتيجة المباشرة لتلك الظاهرة هى انخفاض كثافة تأثير الصوب وبالتالى انخفاض الحرارة. وبدأت حلقة تصاعدية فى الحدوث، حيث يؤدى

التبريد لمزيد من الترسب والإذابة المتسارعة لثانى أكسيد الكربون، وهو ما كان يؤدى بدوره لخفض الحرارة أكثر فأكثر، إلى أن بلغ الأمر حدًا لا يمكن أن تستمر فيه المياه على هيئة سائلة ولتتحول فى نهاية المطاف لجَليد فى طبقة تدعى (البيرمافروست) موجودة على سطح المريخ. وانتهى الأمر بالمريخ بأن يظهر بالشكل الذى نعرفه اليوم بغلاف جوى ضعيف مكون بالأساس من ثانى أكسيد الكربون، مع الغياب الكامل للمياه على الهيئة الغازية أو السائلة.

لا شك أن التوصيف السابق ليس إلا ترجمة لواحدة من النظريات التى تهدف البعثات الفضائية الحالية لإثباتها. فمن الممكن كذلك أن تظل كمية الغاز التى يتم تحريرها ضعيفة، ومن المحتمل أن تأثير الصوب لم يكن أبدا كافيا لكى تتشكل مساحات هائلة من المياه السائلة.

عُطَارِد ذلك العالم الغامض

بالابتعاد عن الشمس، فإن أول كوكب نقابله هو عطارد، على مسافة متوسطة مقدارها (٠,٣٨) وحدة فلكية من الشمس. ومدار عطارد بيضوىّ مسطح نسبيًا والمسافة بينه وبين الشمس شديدة التغير فى الواقع، وتتراوح بين (٠,٣١) و(٠,٤٧) وحدة فلكية.

إن قرب عطارد من الشمس يفسر السبب فى أنه برؤيته من الأرض لا يبتعد كثيرا عن موضع نجم النهار، ذلك أن الانحراف الزاوى الأكبر ليس سوى ثمانٍ وعشرين درجة. عطارد إذن لا يمكن رؤيته من الأرض إلا خلال فترة قصيرة للغاية، وقت شروق الشمس أو غروبها. وفضلا عن ذلك، فإن عطارد له قطر ظاهرى صغير للغاية وهو ما يجعل عمليا من المستحيل رصد أقل تفاصيل لسطحه.

ولذلك لم يتمكن العلماء من التعرف على عطارد إلا فى ستينيات القرن الماضى؛ حيث نجحوا باستخدام الرادار فى قياس فترة دوران الكوكب حول الشمس. قام علماء الفلك بإرسال موجات راديوية نحو عطارد ثم تحليل

الإشارات المنعكسة منه. وكشفت الموجات المنعكسة عن إزاحة فى الطول الموجى مرتبطة بتأثير دوبلر المَعْزوّ لحركة دوران الكوكب حول محوره، وهو ما سمح بقياس سرعته. وتم تقدير زمن الدوران بهذا الشكل بنحو تسعة وخمسين يوما أرضيا.

وتكمن خصوصية هذا المقدار فى أنه يعادل بالضبط ثلثَى فترة دوران الكوكب حول الشمس، وهى ثمانية وثمانون يوما. ولا يتعلق الأمر بمجرد توافق، وإنما بنتيجة التأثير الجذبوى للشمس على دوران عطارد، وهى الآلية الموجودة أيضا فى حالة القمر. ولنلحظ أنه بالنسبة لسكان افتراضيين لعطارد، سيكون وقع دوران الكوكب ببطء حول محوره وبسرعة كبيرة حول الشمس وقعا غريبا؛ حيث أن المدة بين تعامد الشمس مرتين متتاليتين على نقطة بذاتها على الكوكب تساوى ضعف مدة الدوران حول الشمس. وبقول آخر، فإن اليوم بعطارد يستمر لعامين!

ويُعدُّ عطارد، بقطره الذى يبلغ أربعة آلاف وتسعمائة كيلومتر، ثانى أصغر كواكب المجموعة الشمسية. ويتسم بكتلة وبجاذبية ضعيفتين للغاية، الأمر الذى لم يُتِحْ له تكوين غلاف جوى من حوله. ورغم ذلك كشفت المركبة (مارينر ١٠)، التى حلقت فوق عطارد فى ثلاث رحلات فى عام ١٩٧٤ وعام ١٩٧٥، بضعة آثار لغازات نادرة مثل الأرجون والنيون والهليوم. وكانت نتيجة غياب الغلاف الجوى هى الفرق الكبير فى درجة الحرارة بين النهار والليل. فقد أوضحت (مارينر ١٠) أن الحرارة على السطح المواجه للشمس تبلغ أربعمائة وسبعين درجة مئوية، فى حين أنها تهوى إلى مائة وثمانين درجة تحت الصفر على الوجه المظلم.

وقد أفاد كذلك تحليق (مارينر ١٠) حول عطارد فى تصوير نحو خمسةٍ وأربعين بالمائة من سطح الكوكب. وكشفت صورها عالمًا مشابهًا للقمر مغطى بآلاف الفوهات. وتبدو بعض التكوينات أكثر قِدَمًا، وبوجه خاص الأخاديد الطويلة للغاية، والتى يصل طولها أحيانا لخمسمائة كيلومتر، والتى تكاد ترسم مربعا هائلا على الكوكب. ومن المرجح أن تكون تلك الأخاديد قد تشكلت

نتيجة تعرض الكوكب بعد مولده لانخفاض شديد فى درجة حرارته؛ الأمر الذى أدى لتكون شقوق على سطحه. وكشفت (مارينر ١٠) أيضا وجود فوهة شاسعة يبلغ قطرها ألفًا وثلاثمائة كيلومتر تدعى حوض (كالوريس)، يرجح أن تكون نشأت نتيجة الاصطدام مع نيزك عملاق. ويُعتقد أن الاصطدام كان كارثيا بحيث أنه ولَّد موجات زلزالية انتشرت وتسببت فى بروز سلسلة من الجبال على الجانب الآخر من الكوكب فى الناحية المعاكسة للفوهة النيزكية.

كوكب الزُّهَرة

بعد كوكب عطارد نصل إلى الزهرة، على مسافة نحو (٠,٧٢) وحدة فلكية من الشمس. وبرصده من الأرض، فإن كوكب الزهرة لا يبتعد مطلقا عن الشمس، حيث لم يحدث أن زاد انحرافه الزاوى على خمس وأربعين درجة.

ويُعد كوكب الزهرة أحد الأجسام الأكثر جذبا للانتباه فى رصدها، لأنه بفعل دورانه حول الشمس يمر بدورة مراحل مثل أطوار القمر، ويمكن رصدها بمرقب صغير. فضلا عن ذلك، حين تقترب به دورته نسبيا من الأرض، فإنه يكون الجرم الأكثر إضاءة بالسماء بعد الشمس والقمر.

ويتسم كوكب الزهرة بأنه شديد التشابه بكوكب الأرض من حيث حجمه . يبلغ قطره اثنى عشر ألفًا ومائة كيلومتر. ومن حيث كتلته وتركيبته الكيميائية. ويتعلق أبرز أوجه الاختلاف بمظهره الخارجى. ففى الواقع، وعلى عكس كوكبنا، يتسم كوكب الزهرة بغلاف جوى معتم تماما يمنعنا من رصد سطحه، وقد شكَّل ذلك العائق عقبة كبرى فى دراسة الكوكب. فقد بقيت بهذا الشكل فترة دوران الكوكب حول الشمس مجهولة حتى بداية الستينيات من القرن الماضى، حتى بدأ علماء الفلك فى الاستفادة من الرادارات لرصده. وقد كشفوا حينذاك أن الزهرة يختلف عن باقى الكواكب فى أنه يدور حول نفسه فى الاتجاه العكسى مقارنة بباقى الكواكب، وفى فترة طويلة للغاية تصل إلى مائتين وثلاثة وأربعين يوما أرضيا.

لقد بدأ كوكب الزهرة فى أن يكون محل دراسة بحق منذ بداية عهد ارتياد الفضاء. وكان أول كواكب المجموعة الشمسية التى تحلق فوقها مركبات فضائية، وبوجه خاص المركبة (مارينر ٢) فى عام ١٩٦٢، والتى تبعها أسطول كامل من المركبات، بدأ برحلات أمريكية أخرى (مارينر) حلقت فوق الكوكب، ثم عدة مركبات سوفيتية باسم (فينيرا)، والمركبة الأمريكية (بيونير ڤينوس مالتيبرو) التى دخلت جميعها فى غلافه الجوى ورست على سطحه. وأخيرا جاءت (بيونير ڤينوس أوربيتر)، ومركبات سوفيتية أخرى باسم (فينيرا)، وكذلك المركبة الأمريكية (ماجلان) وكلها حلقت فى مدار حول الكوكب وأجرت مسحا لتضاريسه باستخدام أجهزة الرادار، الأمر الذى أتاح رسم خريطة لسطحه.

الغلاف الجوى لكوكب الزهرة

إن الخاصية الأكثر تميزا لكوكب الزهرة قد تكون بالتالى غلافه الجوى. فقد وجدت المركبات الفضائية عليه تكوينا مختلفا للغاية عن تكوين الأرض، مع وجود نسبة تزيد على خمسةٍ وتسعين بالمائة من الغازات الكربونية، وبقليل من النتروجين ومع كميات ضئيلة للغاية من غازات أخرى. لقد أظهرت تلك المركبات كذلك أن الغلاف الجوى للكوكب ليس معتما فى مجمله فى الحقيقة، لكن ثمة سُحبًا مركزة فى طبقات رقيقة نسبيا، على ارتفاع نحو خمسةٍ وأربعين إلى خمسةٍ وستين كيلومترا من السطح، هى التى تحول دون رصده. وتتكون تلك السحب بشكل أساسى من قطرات حمض الكبريتيك مع قليل من الماء وغبار الكبريت. وتتحرك تلك السحب بسرعة كبيرة تصل إلى ثلاثمائة وخمسين كيلومترًا فى الساعة وتدور حول الكوكب فى أربعة أيام أرضية، وهى سرعة أكبر بنحو ستين مرة من سرعة دوران الكوكب.

وتبدو الشروط الجوية على سطح كوكب الزهرة موحشة للغاية. فقد رصدت تلك المركبات على سطحه ضغطا جويا يزيد بنحو تسعين مرة على الضغط الجوى على الأرض، كما رصدت درجات حرارة شديدة الارتفاع، تصل إلى أربعمائة وثمانين درجة مئوية. هذه الحرارة شديدة الارتفاع هى التى تفسر لماذا

يبدو كوكب الزهرة مختلفا تماما عن الأرض. فبعد النشأة، كان الكوكبان محاطين بغلاف جوى غنى بالغاز الكربونى وبالمياه. وعلى الأرض، تكثف بخار المياه تدريجيا ليشكل المحيطات. وتم امتصاص الغاز الكربونى الجوى واحتباسه فى الصخور. أما فى كوكب الزهرة فقد حدث العكس، فقد كان من نتيجة القرب من الشمس، وبالتالى ارتفاع درجة الحرارة أن حال دون حدوث هاتين العمليتين واحتفاظ الغلاف الجوى بشكل ما بتكوينه الأوَّلى.

ولكن حتى لو كان القرب من الشمس هو بشكل ما سبب ارتفاع درجة الحرارة على كوكب الزهرة، فإنه لا يكفى وحده لتبرير وصول تلك الدرجة إلى أربعمائة وثمانين درجة. ومرة أخرى، يُعزِى العلماء ارتفاع الحرارة بهذا الشكل إلى تأثير الصوب؛ ولعلنا نعيد هنا شرح معنى تأثير الصوب. وكما يؤكد اسمها، فإن تلك الظاهرة تشبه الظاهرة التى تؤدى إلى سخونة الهواء فى صوب النباتات، حيث يأتى الضوء الذى يدخل صوبة النباتات من الشمس، وتتركز أعلى درجة لكثافة الضوء فى نطاق الضوء المرئى وبشكل أكثر دقة فى إطار اللون الأصفر. وبما أن الزجاج شفاف ومُنْفذ للضوء المرئى، لا تجد الأشعة الشمسية صعوبة فى الدخول فى الصوبة. ويكون من شأن المادة الموجودة بالداخل أن تمتص الإشعاع ثم تعيد بثه. لكن لما كانت حرارة تلك المادة أقل من حرارة الشمس، فإن الضوء المرتد يكون فى نطاق الأشعة تحت الحمراء. لكن الصوبة تَحُول دون نفاذ الأشعة تحت الحمراء؛ ومن ثَم يحتبس الإشعاع المرتد داخل الصوبة. ويتم الاحتفاظ بالطاقة التى ينقلها، وتتحول فى النهاية لحرارة، تعمل على تسخين الصوبة.

وتحدث ظاهرة مماثلة فى حالة كوكب الزهرة، لكن الغاز الكربونى الموجود فى الغلاف الجوى هو الذى يلعب دور الزجاج فى الصوبة.

إن تلك الآلية هى التى أدت إلى زيادة درجة حرارة كوكب الزهرة شيئا فشيئا حتى وصلت للقيمة الحالية. ولنلاحظ أن تأثير الصوب يوجد أيضا على الأرض لكن بشكل أقل؛ لأن تركيز الغاز الكربونى بالأرض أضعف كثيرا.

سطح الزهرة

لقد انكشفت لنا طبوغرافية كوكب الزهرة بالأساس عن طريق المركبات الفضائية على نحو ما أسلفنا. وقد أظهرت الخرائط التى صُوِّرت بدرجة دقة تصل لنحو مائة متر، أن سطح الزهرة تسوده بشكل عام سهول شاسعة. وتتكسر تلك الرتابة بمنطقتين مرتفعتين شاسعتين بحجم قارة كاملة أطلق عليهما اسم (أفروديت تيرا) و(عشتار تيرا).

وعلى صعيد المشاهد الطبيعية فى الزهرة، فإنها تتميز بتكوينات بركانية عديدة، حيث توجد العديد من البراكين المرئية وبوجه خاص مرتفع (ماكسويل) الذى يبلغ ارتفاع قمته أحد عشر كيلومترا. هناك كذلك قباب غريبة على شكل شطيرة، ربما تكون مكونة من صُهَارة بركانية لزجة للغاية، فضلا عن آثار عديدة لتدفقات قديمة من الصهارة. إن كل الظواهر المرصودة تكشف فى الواقع أن كوكب الزهرة كان يشهد نشاطا بركانيا شديدا حتى حقبة حديثة للغاية، ربما ليس أبعد من عشرة ملايين سنة قبل الآن. بيد أن المركبات الفضائية لم ترصد أى نشاط فى الوقت الحالى ولم تكتشف كذلك أى أثر لحركة لألواح تكتونية، مثلما هو الحال على كوكب الأرض.

وفضلا عن التكوينات البركانية، فإن الخاصية الأخرى المهمة هى وجود العديد من حفر الاصطدام، وكلها ذات قطر يزيد على عدة كيلومترات، وهى دليل على أن الغلاف الجوى الكثيف للغاية قد فتَّت معظم النيازك ذات الحجم الصغير. وختامًا؛ فقد كشفت الصور الفوتوغرافية التى التقطتها المركبات فينيرا، التى هبطت بسلاسة على سطح الكوكب، مشاهد طبيعية صحراوية وصخرية، بدت برتقالية اللون بسبب الغلاف الجوى.

الأرض: الغلاف الجوى والغلاف المغناطيسى

بعد الزهرة نصل إلى كوكبنا الأرض، بقطر يبلغ اثنى عشر ألفا وثمانمائة كيلومتر. تُعد الأرض هى الكوكب الأكبر بالمجموعة الشمسية الداخلية. تدور

الأرض حول الشمس مرة فى العام، على بعد مسافة متوسطة قدرها مائة وخمسون مليون كيلومتر. وتحدد تلك المسافة أحد المقاييس، وهو الوحدة الفلكية، التى تستخدم لقياس المسافات فى المجموعة الشمسية. ويدعى مستوى مدار الأرض حول الشمس دائرة البروج، وهو يستخدم أيضا كمرجعية فى المجموعة الشمسية.

وتدور الأرض حول نفسها فى أقل قليلا من أربع وعشرين ساعة، وهو ما يؤدى لتعاقب الليل والنهار. ويتسم محور دورانها بميل بثلاث وعشرين درجة عن الاتجاه العمودى على مستوى دائرة البروج. ويحتفظ ذلك المحور باتجاه شبه ثابت بالنسبة للنجوم، لكن اتجاهه يتغير خلال الدوران الأرضى بالنسبة للشمس، وتلك الخصوصية هى السبب فى تعاقب الفصول. بهذا الشكل، يكون النصف الشمالى من كوكبنا، فى نهاية شهر يونيه، أقرب قليلا من الشمس، ويستقبل قدرا أكبر من إشعاعها، فيكون اليوم أطول وتكون الحرارة أكثر ارتفاعا، ويبدأ فصل الصيف فى هذه البقعة من الكرة الأرضية. وبالعكس، فى نهاية شهر ديسمبر، يكون النصف الجنوبى هو الأقرب من الشمس. وفى نصف الكرة الشمالى، يكون اليوم أقصر والحرارة أقل؛ ليبدأ فصل الشتاء. وفى الفترات الانتقالية، لا يكون أى من نصفَى الكرة مميزا، وتكون الحرارة متوسطة، وكذلك طول الأيام، فنكون إما فى الربيع أو فى الخريف.

الغلاف الجوى للأرض

إن أحد الخصائص التى تميز كوكبنا هو تكوين غلافه الجوى. حيث يحتوى ذلك الغلاف على ثمانية وسبعين بالمائة من النتروجين وواحد وعشرين بالمائة من الأكسجين. ويتكون الباقى من غازات نادرة مثل الأرجون والغازات الكربونية وبخار المياه، مع نسب خفيفة لمكونات أخرى، فضلا عن العديد من الجزيئات العالقة. ومن باب المقارنة، فإن كوكبَى الزهرة والمريخ لهما غلاف جوى يسود به الغاز الكربونى مع قليل من النتروجين وبالطبع بلا أكسجين. وتعود الكمية الكبيرة من الأكسجين الموجودة بالأرض للظاهرة الأرضية الأبرز وهى الحياة. لقد كانت نشأة الكائنات الحية فى الواقع هى التى غيرت ببطء غلافنا الجوى بتزويده بالأكسجين.

وحدود الغلاف الجوى ليست محددة بشكل واضح. ورغم أن الكثافة تقل مع الارتفاع، يمكن استشعاره على بعد آلاف الكيلومترات. وقد أتاحت تغيرات الحرارة مع الارتفاع تحديد عدة طبقات فى الغلاف الجوى. فبدءًا من الأرض، تقل درجة الحرارة حتى تبلغ خمسًا وخمسين درجة تحت الصفر حتى ارتفاع نحو عشرة كيلومترات. وتدعى تلك الطبقة (التروبوسفير)، وتضم ثلاثة أرباع الكتلة الكلية للغلاف الجوى، وتحدث بها كل الظواهر الجوية من السحب والأمطار وغيرها. وفوق (التروبوسفير)، ترتفع درجة الحرارة حتى تبلغ الصفر عند ارتفاع نحو خمسين كيلومترا؛ إنها طبقة (الستراتوسفير). ويوجد بها بوجه خاص جزيئات الأوزون التى تلعب دورا أساسيا فى امتصاص الأشعة فوق البنفسجية للشمس، وتمنعها بذلك من بلوغ سطح الأرض. إن عملية الامتصاص هذه على وجه التحديد هى التى تؤدى لزيادة درجة حرارة الطبقة.

بعد ذلك، تبدأ درجة الحرارة فى الانخفاض مرة أخرى حتى خمسةٍ وثمانين كيلومترًا؛ إنها طبقة (الميزوسفير). ثم تعاود درجة الحرارة ارتفاعها فى طبقة (الترموسفير)، وهى الطبقة التى تتحول بها الأجسام الصغيرة بالمجموعة الشمسية إلى شُهُب أو نيازك. وبعد نحو خمسمائة كيلومتر، يبدأ (الإكزوسفير) أو الغلاف الخارجى. عند ذلك المستوى، تقتصر المكونات الرئيسة على الهيدروجين والهليوم. ولا تكون تلك المكونات مرتبطة بالأرض، ويمكنها بالتالى الإفلات من جاذبيتها والهروب للوسط بين الكوكبى.

المجال المغناطيسى

ثمة عنصر آخر مهم حول الأرض وهو المجال المغناطيسى؛ فالأرض مزودة بمجال مغناطيسى، ويمكننا فى أى وقت التيقن من وجوده باستخدام بوصلة بسيطة. وسبب وجود ذلك المجال هو، على الأرجح، التيارات الكهربائية التى تدور فى الجزء السائل من النواة الحديد بكوكبنا. وتجدر الإشارة إلى أن

محور المجال المغناطيسى ليس متوافقا مع محور دوران الأرض، بل إنه يميل بنحو إحدى عشرة درجة. ويفسر ذلك أن القطب الشمالى المغناطيسى موجود فى كندا، وبعيد نسبيا عن القطب الشمالى الجغرافى المقترن بمحور الدوران.

ويؤدى تأثير المجال المغناطيسى إلى إيجاد منطقة تدعى (المغناطيسفير)، تكون فيها حركة الجزيئات خاضعة لتأثير هذا المجال للأرض، ويتحدد شكل تلك المنطقة بتفاعل جزيئات الرياح الشمسية مع المجال المغناطيسى، ومن ثم يرتبط بنشاط الشمس. وفى اتجاه الشمس، يمتد المغناطيسفير لنحو ستين ألف كيلومتر. لكن فى الاتجاه المقابل لها، فإنه يستطيل مشكّلاً ذيلاً قد يمتد لملايين الكيلومترات.

وحين تصل جزيئات الرياح الشمسية لكوكبنا، يتصدى لها المجال المغناطيسى، فيحيد معظمها ويحيط بالمغناطيسفير. ويتم اصطياد الجزيئات التى تنجح فى الاختراق، فتدور فى دوائر حلزونية حول خطوط المجال المغناطيسى، وتتنقل بالتبادل من قطب مغناطيسى لآخر. وتؤدى تلك الحركة لنشأة منطقتين غنيتين بالجزيئات، هما حزاما (ڤان إلن) الإشعاعيان، نسبة إلى مكتشفهما، واللذان يشكلان حلقتين حول الأرض. وتقع المنطقة الأولى على ارتفاع نحو خمسة آلاف كيلومتر، وتحتوى بشكل خاص على بروتونات مشحونة بالطاقة، والثانية على ارتفاع خمسة وعشرين ألف كيلومتر، وتحتوى على إلكترونات وبروتونات ذات طاقة أقل. وجدير بالذكر إن حزامَىْ (ڤان إلن) يجسدان الكشف الكبير الأول الذى أتاحته الأقمار الصناعية.

ومن وقت لآخر، وبوجه خاص بعد الانفجارات الشمسية، تنجح الإلكترونات والبروتونات المشحونة بالطاقة فى اختراق الطبقات العليا للغلاف الجوى على مستوى المناطق القطبية. الأمر الذى يؤدى إلى تأيُّن الذرات والجزيئات الموجودة، وتؤدى لحدوث ظاهرة ضوئية تدعى الشفق القطبى أو الأسترالى، وفقا للقطب الذى تحدث به.

التكوين الداخلى والألواح التكتونية

التكوين الداخلى

يسمح لنا رصد الزلازل والموجات الاهتزازية التى تنتجها بدراسة التكوين الداخلى لكوكبنا. فبرصد الاهتزازات الناجمة عن الزلازل الأرضية فى مختلف أرجاء الكوكب، يكون من الممكن تحديد المسار الذى تتخذه الموجات الزلزالية فى الكرة الأرضية. وبما أن ذلك المسار يرتهن بطبيعة المواد التى يقابلها، فإنه يفسح المجال للتعرف على التكوين الداخلى لكوكبنا. وثمة طريقة أخرى وهى تحليل الصخور التى تقذف بها البراكين والذى يتيح استكشاف التركيب الكيميائى للطبقات العميقة.

وقد أوضح ذلك النوع من الدراسات أن كوكبنا يتكون من ثلاث طبقات، تختلف بالأساس فى تركيبها الكيميائى. الطبقة الأولى من الخارج فى الكوكب هى القشرة. ويبلغ سُمْكها نحو عشرة كيلومترات تحت المحيطات، ونحو أربعين كيلومترًا تحت القارات. وتتكون تلك الطبقة من صخور ترسيبية من الجرانيت والبازلت، ومكوناتها مختلطة بدرجة أو بأخرى تحت تأثير النشاط الجيولوجى المكثف للأرض. ويوجد تحت تلك الطبقة الوشاح، وهى طبقة صُلْبة يبلغ سمكها نحو ثلاثة آلاف كيلومتر، وتتكون من السيليكات الغنى بالحديد والمغنسيوم. وأخيرًا، فى المركز، توجد النواة المكونة بالأساس من الحديد وقليل من النيكل. وتتكون تلك النواة فى الحقيقة من طبقتين؛ النواة الخارجية السائلة والنواة الداخلية الصلبة. وفى المركز، تصل درجة الحرارة لنحو خمسة آلاف درجة مئوية، ويزيد الضغط بملايين المرات عنه فى السطح.

الألواح التكتونية

ومن الخصائص التى تجعل من الأرض كوكبا مختلفا للغاية وجود الألواح التكتونية؛ فالقشرة والجزء الخارجى من الوشاح يكوِّنان طبقة سُمكها عشرات من الكيلومترات تدعى (الليتوسفير) تتميز بصلادتها. وأسفلها، توجد طبقة (الإستينوسفير) الأقل صلابة، ويمكن لطبقة (الليتوسفير) أن تتحرك ببطء

أعلاها. ولا تتكون طبقة (الليتوسفير) من كتلة واحدة، لكنها تنقسم لعدة ألواح يمكنها أن تنتقل بشكل طفيف بالنسبة لبعضها البعض بالانزلاق على (الإستينوسفير).

وتتنقل تلك الألواح تحت تأثير الحمل الحرارى فى الوشاح. ففى الواقع، تنتقل الطاقة، الناجمة عن تحلُّل النَّوِيات المشعة فى مركز الأرض، للخارج عن طريق ظاهرة الحمل الحرارى، حيث تصعد الصخور الساخنة نحو السطح وتغوص الصخور الأكثر برودة نحو الأعماق. وتؤدى تلك الحركة للمادة فى (الإستينوسفير) لحركة الألواح بطبقة (الليتوسفير) والتى نطلق عليها تكتونية الألواح. بهذا الشكل، على سبيل المثال، فإن اللوح الذى يحمل أمريكا الجنوبية ينفصل عن اللوح الذى يحمل أفريقيا بسرعة نحو ثلاثة سنتيمترات فى العام.

والألواح التكتونية يُعزى إليها معظم التكوينات الجيولوجية الموجودة على الأرض. فعندما يصطدم لوحان على سبيل المثال قد يؤدى هذا الاصطدام إلى تولد سلسلة من الجبال؛ مثلما حدث فى حالة جبال الهيمالايا التى نجمت عن اصطدام الألواح التى تحمل الهند والصين. ويحدث أيضًا أن ينزلق لوح تحت الآخر مؤديًا لنفس النتيجة مثل حالة جبال (الأنديز).

ومن النتائج المهمة لتكتونية الألواح هى تجدد تضاريس السطح الأرضى. فى منتصف المحيط الأطلنطى، توجد قمة تدعى مظلة المحيط؛ حيث يشهد هذا المكان انفصال لوحين الأمر الذى يتيح لصخور ذائبة من الوشاح بالصعود إلى السطح. والظاهرة العكسية تحدث فى مناطق تشهد انزلاق لوح تحت آخر حيث يعود أحد الألواح للغوص صوب الأعماق. بهذا الشكل، ونتيجة لهاتين الظاهرتين تصعد المادة من الوشاح بشكل مستمر للسطح ثم تعاود النزول بعد مئات الملايين من السنين؛ الأمر الذى يسفر عن التجدد الدائم لسطح الأرض فى ظاهرة لا مثيل لها فى المجموعة الشمسية. ويفسر ذلك بشكل خاص أنه حتى لو كانت الأرض قد تعرضت لقذف حاد من النيازك فى شبابها، فلابد أن تكون آثار مثل هذا القصف قد زالت؛ لذلك نجد الفوهات النيزكية نادرة للغاية على سطح كوكبنا.

وأحد توابع نشاط كوكبنا هو إطلاق الغاز البركانى فى الغلاف الجوى. ففى الواقع، يذوب الغاز الكربونى الجوى بسهولة فى مياه الأمطار، وسرعان ما يتسلل إلى التربة على هيئة كربونات، أو يذوب فى المحيطات. ولو أنه بقى مختزنا فى الصخور أو المحيطات، لكان تأثير الصوبة على كوكبنا أقل ولبدأت الحرارة فى الانخفاض على غرار حالة المريخ. غير أن انطلاق الغاز مع الصُّهارة البركانية إلى الغلاف الجوى، يؤدى إلى ثبات مستوى الغاز الكربونى ويكفل اعتدال الحرارة فى الغلاف الجوى.

الاحتباس الحرارى فى كوكب الأرض

يؤكد تحليل الطبقات الجيولوجية على الأرض إن متوسط الحرارة على كوكبنا فى مجملها ليست مستقرة لكن تتغير مع الوقت. لقد كان كوكبنا، على سبيل المثال، أبرد بنحو عشر درجات منذ عشرين ألف عام إبان ذروة العصر الجليدى الأخير. إلا إن تلك التغيرات تتسم بأنها بطيئة للغاية، حيث لم تتزحزح درجة الحرارة إلا بنحو (٠,٢) درجة مئوية بين عام ألف ونهاية القرن التاسع عشر.

غير أن المجتمع الدولى يعتريه القلق فى الوقت الحالى بسبب تسارع هذه الظاهرة، حيث صارت تحدث بمعدلات ليس لها مثيل. فمنذ نهاية القرن التاسع عشر، زادت درجة الحرارة فى المتوسط على الكرة الأرضية على مدى مائة عام فحسب بنحو (٠,٦) درجة. والأسوأ من ذلك أن عمليات المحاكاة بالكمبيوتر تؤكد فيما يبدو أن ظاهرة الارتفاع الحرارى سوف تتسارع، وأن متوسط درجة الحرارة قد يزيد بنحو (١,٤) إلى (٥,٨) درجة من الآن وحتى نهاية القرن الحادى والعشرين. إنها الظاهرة التى تدعى الاحتباس الحرارى.

تأثير الصوب

وترتبط تغيرات درجة حرارة الغلاف الجوى بشكل عام بالعديد من العوامل، مثل تقلبات نشاط الشمس أو سرعة دوران الأرض. لكن الأغلبية من العلماء

يعتقدون أن السبب الأكبر للاحتباس الحالى بالكوكب هو ظاهرة مختلفة تدعى تأثير الصوب. إنها عملية تتمثل فى احتجاز الغلاف الجوى لكمية كبيرة من طاقة الشمس التى تصل الأرض بدلاً من عكسها وردها للفضاء.

ولقد أشرنا فيما سبق أنه وفقا لقانون وين، فإن طبيعة الإشعاع الذى يبثه جسم ما ترتهن بدرجة حرارته. فالشمس بحرارة سطحها التى تبلغ ستة آلاف درجة تطلق إشعاعاتها بالأساس فى المجال المرئى، وتخترق طاقتها بسهولة الغلاف الجوى للأرض. لكن بما أن حرارة الأرض تقل كثيرا عن طاقة الشمس، فإن كوكبنا يعيد تلك الطاقة على هيئة أشعة تحت حمراء. غير أن بعض الغازات فى الغلاف الجوى، مثل ثانى أكسيد الكربون والميثان وأول أكسيد النتروجين، رغم أنها تسمح بنفاذ الأشعة فى المجال المرئى، فإنها تَحُول دون نفاذ الضوء تحت الأحمر. وبالتالى تحتجز الإشعاع المرتد من الأرض وتمتص طاقته، فترتفع درجة الحرارة. ويتم بهذا الشكل امتصاص جزء كبير من الطاقة الشمسية عن طريق الغلاف الجوى الأرضى، وهى الظاهرة التى تتكرر ولكن بدرجة أعظم على كوكب الزهرة.

ويُعزى السبب الأرجح لتسارع تأثير الصوب والاحتباس الحرارى منذ نهاية القرن التاسع عشر إلى تأثير الإنسان على البيئة، حيث يتم إطلاق كميات كبيرة من الغازات المسببة لتأثير الصوب إلى الغلاف الجوى عن طريق العديد من الأنشطة الحديثة، مثل استخدام المواد القابلة للاشتعال فى الصناعة والنقل؛ وكذلك بعض الممارسات الزراعية مثل تجريف الغابات وتربية المواشى. ومن هذا المنطلق يمكن القول على سبيل المثال بأن تركُّز ثانى أكسيد الكربون فى الغلاف الجوى قد زاد بنحو ثلاثين بالمائة منذ بداية عصر الصناعة، وهو ما يسهم بشكل لا يمكن تجاهله فى تأثير الصوب.

تأثيرات الاحتباس الحرارى

وقد تجلت بالفعل تأثيرات الاحتباس الحرارى فتجسدت، على سبيل المثال، فى انحسار الوديان الجليدية وارتفاع مستوى المحيطات لنحو عشرة سنتيمترات بسبب التمدد الحرارى للمياه؛ فضلا عن تناقص سمك القلنسوة القطبية. ومن

المتوقع أن يؤدى تسارع الظاهرة فى القرن الحادى والعشرين لتأثيرات أشد لاسيما فى صورة زيادة أكبر بكثير فى المستوى المتوسط للمحيطات، وتغيرات حادة فى الأحوال الجوية مع حدوث موجات حرارية شديدة السخونة وفترات هطول سيول عارمة.

ومن المتوقع أن تتجلى هذه التأثيرات على سكان العالم فى صورة مزيد من الفيضانات ومزيد من التصحر والجفاف ومشكلات فى توفير المياه الصالحة للشرب، وزيادة فى الأمراض مثل الملاريا، وغرق بعض المناطق الساحلية أو الجزر ذات الارتفاع المنخفض. وعلى المدى الأبعد، يمكننا توقع ظواهر مثل ذوبان القلنسوة القطبية التى تغطى جرينلاند، وهو ما قد يتسبب فى صعود مستوى المحيطات لستة أمتار مع اختفاء معظم المناطق الساحلية بالعالم.

قمر الأرض

للقمر قطر يبلغ ثلاثة آلاف وأربعمائة وثمانين كيلومترًا؛ أى نحو ربع قطر الأرض. وهو يدور حول كوكبنا على مسافة متوسطة تبلغ ثلاثمائة وأربعة وثمانين ألف كيلومتر، فى مدار يميل قليلا بالنسبة لمستوى البروج. ويدور القمر حول نفسه فى أكثر قليلا من سبعة وعشرين يوما. والظاهرة المثيرة للانتباه هى أن تلك المدة مساوية بالضبط للزمن الذى يستغرقه تابعنا لكى يكمل دورة كاملة حول الأرض والعودة إلى نفس الوضع فى سمائنا، وهو ما يُسمى بفترة الدوران اليومى للقمر. وبسبب هذا التساوى فى المدتين، فإننا نرى دوما نفس الوجه للقمر.

ويرجع التساوى بين فترتَى الدوران حول الأرض والدوران اليومى إلى واقع أن القمر ليس على هيئة كرة تامة الاستدارة وإنما تتسم بشىء من الانبعاج؛ وبالتالى كان للجاذبية الأرضية بعض التأثير على دوران القمر حول نفسه، وتجلى ذلك فى الماضى فى جعل محور استطالة القمر يستقيم مع الخط الرابط

بين الأرض والقمر. ومنذ أن حدث ذلك، انحصرت استطالة القمر فى اتجاه الأرض، وبذلك صرنا لا نرى للقمر إلا وجهًا واحدًا.

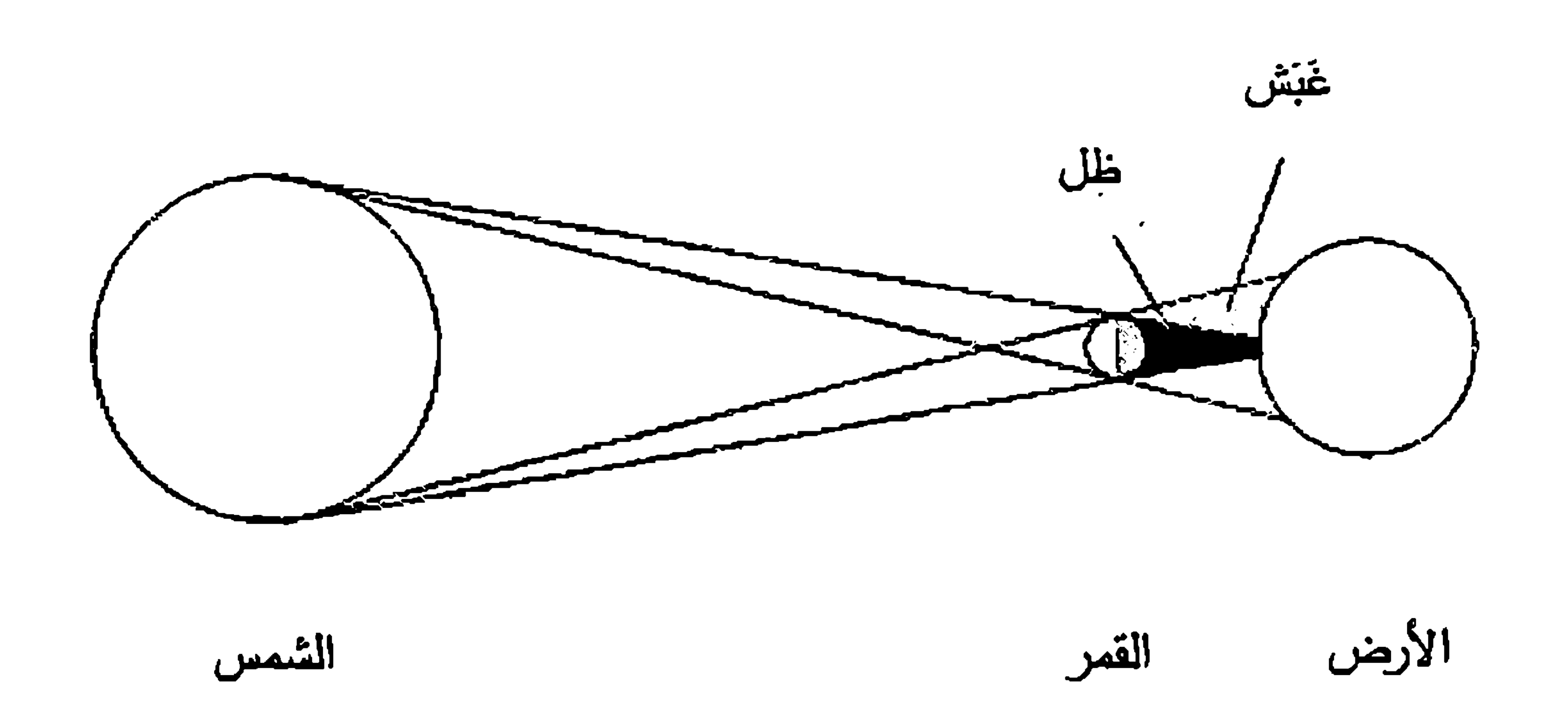
ومن الملحوظ أننا فى الحقيقة يمكننا أن نرصد ما يربو قليلا على نصف سطح القمر. ويرجع ذلك فى الواقع، إلى أن مدار القمر ليس دائريا تماما، ومحور دورانه ليس عموديا تماما على ذلك المدار. ومن ثَم يتأرجح القمر بشكل طفيف بالنسبة لنقطة توازنه، وهى الظاهرة المعروفة باسم "التمايل" أو اهتزاز القمر حول قطبه. ويسمح لنا ذلك على المدى البعيد برصد نسبة تصل إلى تسعةٍ وخمسين بالمائة من سطح القمر دون مغادرة الأرض.

وبفعل دورته حول كوكبنا، يغير القمر بشكل مستمر من موضعه بالنسبة لاتجاه الشمس/الأرض، وبالتالى يتغير اتجاه جانبه المضىء بالنسبة لمحور الأرض/القمر، وهو ما يفسر إنه على مدار شهر قمرى يتغير شكل القمر، ويمر بسلسلة من الأطوار. ولذلك حين يقع القمر مباشرة بين الشمس والأرض، فلا يُرى الجانب المضىء منه، ونبدأ فى البحث عن القمر الجديد. وبالعكس حين يكون القمر فى الاتجاه المقابل للشمس، فإننا نرى الجانب المضىء بأكمله ونكون أمام البدر المكتمل.

كسوف الشمس

ويحدث كسوف الشمس حين يقع القمر بالضبط بين الأرض والشمس. وبالنسبة لراصد من الأرض، فإنه ثمة ثلاث حالات؛ فى الحالة المثالية، وهى حالة الكسوف الكلى، يكون قرص القمر متراكزا تماما مع خط الأرض/ الشمس وبالتالى يغطى بشكل كامل سطح الشمس، وتسود الظلمة حينذاك فى صميم النهار، ويمكن أن تستمر لعدة دقائق. وبما أن سطح الشمس يكون مغطى، فإن الغلاف الجوى للشمس وهالته الضوئية يكونان ظاهرين فى مشهد بديع. فى الحالة الثانية، لا يكون قرص القمر متراكزا مع قرص الشمس؛ وبالتالى لا يختفى سوى جزء من سطح الشمس ونكون فى هذه الحالة بصدد كسوف جزئى، وهى ظاهرة أقل جمالا بكثير. أما الحالة الأخيرة فتحدث حين يكون من شأن المسافات النسبية للأجسام الثلاثة أن تجعل قرص القمر يبدو أقل حجما

من قرص الشمس. ففى هذه الحالة، يختفى الجزء المركزى فقط من الشمس، ونكون بصدد كسوف حلقى يبدو فيه قرص القمر محاطا بحلقة من ضوء الشمس.

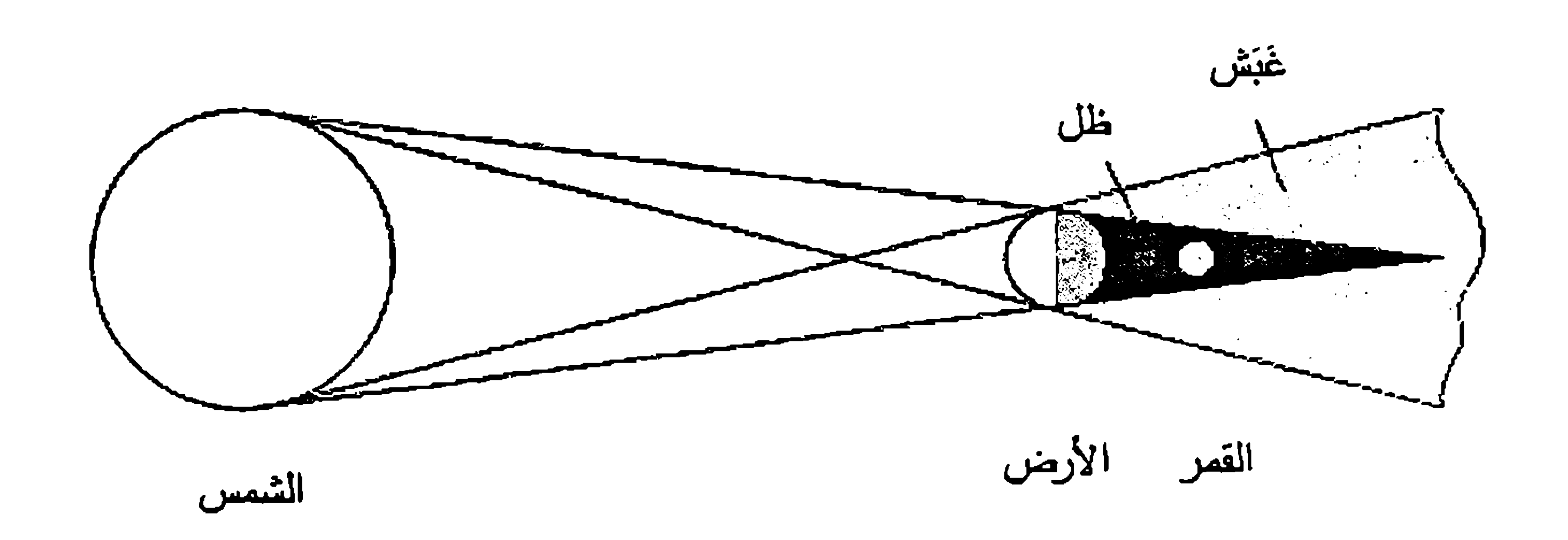


كسوف للشمس يحدث إبان مرور القمر بين الأرض والشمس.

خسوف القمر

أما عن خسوف القمر، فهو يحدث حين تمر الأرض تماما بين الشمس والقمر، فتحجب ضوء الشمس عن القمر فلا يكون مضاءً بشكل كامل. وحتى فى أفضل الحالات، حالة الخسوف الكلى عندما تكون الاستقامة تامة، لا يختفى القمر من السماء. ففى الواقع، من شأن أشعة الشمس التى تمر على أطراف الأرض أن تنحرف بفعل الغلاف الجوى، ويذهب جزء منها ليضفى ضوءا ضعيفا على القمر. جدير بالذكر أيضا أن ضوء الشمس حين يخترق غلافنا الجوى؛ فإنه يتعرض لظاهرة تشتت تؤثر بوجه خاص على النطاق الأزرق منه وبشكل أقل على النطاق الأحمر، وبذلك يغلب اللون الأحمر على الضوء الذى يصل للقمر، وهو ما يفسر مظهر الحمرة لحالات الخسوف القمرى.

وتتكرر حالات الكسوف والخسوف فى مجملها من أربع إلى سبع مرات فى العام. وهى تتكرر بشكلٍ متساوٍ تقريبا. وإن كانت حالات الخسوف تبدو أكثر تواترا لأنها حين تحدث، تكون قابلة للرصد من نصف سكان الأرض، فى حين أن كسوف الشمس لا يمكن رصده إلا فى منطقة محدودة للغاية من سطح الأرض:



خسوف للقمر يحدث إبان مرور الأرض بين الشمس والقمر.

استكشاف القمر

لقد تمت زيارة القمر خلال العقود الأخيرة عن طريق العديد من المركبات الفضائية. وكانت المركبة الأولى هى المركبة السوفيتية (لونيك ١)، التى حلقت فى عام ١٩٥٩ فى سماء تابعنا على مسافة ستة آلاف كيلومتر. وتبعتها فى الستينيات العديد من المركبات التى تحمل اسم (لونيك) و(لونا) و(زوند) و(رينجر). وكانت المركبة (لونيك ٣) بشكل خاص هى المركبة الأولى فى عام ١٩٥٩ التى ترسل صورا للوجه الخفى للقمر. وكانت المركبة الأولى التى هبطت عام ١٩٦٦ بسلاسة على سطح القمر هى (لونا ٩)، وسرعان ما تبعتها مركبات أخرى باسم (لونا) ومركبات المسح الشامل الأمريكية (سرفاير). وكانت المركبة الأولى التى تستقر فى مدار حول القمر هى (لونا ١٠) فى عام

١٩٦٦، وسرعان ما تبعتها المركبات الأمريكية المدارية (لونار أوربيتر) التى قدمت خرائط فوتوغرافية لتابعنا.

وكان الحدث الأعظم فى مساعى استكشاف القمر بلا شك هو وصول الإنسان إليه فى رحلة (أبوللو ١١) فى العشرين من يوليو ١٩٦٩، وبلغ إجمالى عدد الرحلات المأهولة التى هبطت على سطح القمر بين أعوام ١٩٦٩ و١٩٧٢ ست رحلات. وكان لتلك الرحلات فى المقام الأول سمة رمزية وسياسية فى فترة الحرب الباردة هذه، لكنها كانت تمثل أيضا فرصة للعديد من التجارب، وبشكل خاص عن الغلاف الجوى القمرى ومجاله المغناطيسى وتركيبته الداخلية والرياح الشمسية. كما أتاحت أيضا تجميع صخور قمرية تم إحضارها للأرض للتحليل. وثمة صخور أخرى تم إحضارها للأرض عن طريق المركبات الآلية السوفيتية، وبشكل خاص (لونا ٢٤) التى كانت آخر مركبة قمرية فى السبعينيات.

وترجع الزيارة قبل الأخيرة للقمر لرحلة (كلمنتين) فى عام ١٩٩٤. لقد أمضت تلك المركبة، التى عبرت عن التعاون بين ناسا والمؤسسات العسكرية، شهرين فى مدار حول القمر. وقد التقطت بشكل خاص صورا لسطح القمر فى أربعة أطوال موجية، وقامت بقياسات للارتفاعات باالليزر. وأتاحت تلك العمليات رسم خريطة للمعادن على سطح القمر، وكذلك خريطة طبوغرافية. لكن يبعث على الأسف أن مشكلة بالكمبيوتر أعاقت (كلمنتين) عن إتمام الجزء الثانى من مهمتها، وهو التحليق حول الكويكب (جيوجرافوز).

وتعود الزيارة الأخيرة لرحلة (لونار بروسبكتور) فى عام ١٩٩٨. لقد اتخذت تلك المركبة مدارًا حول القمر على مدى نحو ثمانية عشر شهرًا، بهدف دراسة تكوين سطحه وقياس مجاله المغناطيسى وتحليل تغيرات المجال الجذبوى للقمر. وكانت إحدى النتائج الأكثر أهمية هى اكتشاف تركيزات كبيرة للهيدروجين بالقطبين، وهى دلالة على وجود كميات كبيرة من الثلوج فى بعض الفوهات التى لم تُضئ الشمس باطنها يومًا ولم تسخنه. وانتهت الرحلة عندما تعطلت وسائل السيطرة على المركبة فانسحقت داخل فوهة قرب القطب

الجنوبى للقمر. وكان العلماء يأملون بهذا الشكل استكشاف بخار للماء من منطلق احتمال وجود طبقات من الثلوج، لكن عمليات الرصد من الأرض لم تُتِحْ أى اكتشافات فى هذا الاتجاه.

سطح القمر

يتصف الغلاف الجوى للقمر بأنه خفيف للغاية ولا يحتوى إلا على كمية طفيفة من غازات نادرة، مثل الأرجون أو النيون أو الهليوم. وتتسم الجاذبية على سطح القمر فى الواقع بأنها ضعيفة للغاية بحيث أنها لا تتيح الاحتفاظ بغلاف جوى يُذكر، وقد جرفت الرياح الشمسية منذ وقت طويل أية بقايا لذلك الغلاف. وقد أدى الغياب للغلاف الجوى إلى تفاوتات كبيرة فى درجة الحرارة، حيث تتراوح درجة الحرارة من مائة وسبعين درجة تحت الصفر على الوجه المظلم إلى مائة وعشرين على الوجه المقابل للشمس.

والمجال المغناطيسى للقمر ضعيف للغاية ومتغير بشدة من منطقة لأخرى. غير أن تحليل الصخور أفاد أن القمر كان له فى الماضى مجال مغناطيسى أقوى، إبان أن كانت نواته الحديدية سائلة وفى حالة دوران. لكن مع الوقت بردت تلك النواة وتحولت إلى الهيئة الصلبة؛ الأمر الذى أدى فى نهاية المطاف إلى اختفاء ذلك المجال المغناطيسى بشكل شبه كامل.

الفُوَّهات والبحار القمرية

وسطح القمر معروف لنا الآن بشكل جيد، حيث قدمت المركبات التى تدور حوله خرائط مصورة له بشكل شديد الدقة. وتم إجراء تحاليل مفصلة لصخوره سواء على سطحه مباشرة بواسطة بعض المركبات، أو عن طريق العينات المنقولة إلى الأرض. والسمتان المميزتان لسطح القمر هما وجود تنوع كبير من الفوهات من كل الأحجام، ووجود مساحات شاسعة دَكْناء تدعى البحار القمرية.

ويمكن من الأرض، رؤية عشرات الآلاف من الفوهات بقطر يزيد على الكيلومتر. أما مركبات الفضاء، فقد كشفت من جانبها وجود ملايين الفوهات الأصغر حجما. وقد أثار مصدر هذه الفوهات لوقت طويل الجدل بين مؤيدى فكرة المسبب البركانى لها ومؤيدى فكرة المسبب النيزكى. لكن ذلك المسبب النيزكى فى نهاية المطاف هو الذى تم الاتفاق عليه فى معظم الحالات. فثمة فوهات من كل الأحجام موجودة لأنه لا يوجد غلاف جوى لمنع النيازك الصغيرة من الوصول لسطح القمر. فضلاً عن ذلك، فإن سطح القمر لا يتعرض لأية عملية تعرية ولا لتكتونية الألواح، ومن ثَم فقد اكتسبت تلك الفوهات صفة الأبدية.

وقد أظهر الرصد المقرب للبحار القمرية أن ذلك الاسم (بحار) كان غير مناسب بالمرة، بما أنها ليست سوى مساحات من الصخور الدُّكْناء. ويبعث حجم تلك المساحات على الدهشة، حيث يصل أكبر بحر لقطر يزيد على الألف ومائة كيلومتر. ولا زال أصل تلك البحار قيد البحث فى تاريخ القمر. لقد ولد تابعنا منذ (٤,٦) مليار عام مثل باقى أجرام المجموعة الشمسية. وخلال الثمانمائة مليون سنة الأولى، تعرض السطح الصلب الناشئ حديثا لقصف نيزكى مكثف غطاه بالفوهات. أما الاصطدامات الأكبر فقد أحدثت أحواضا شاسعة. ومنذ (٣,٨) مليار عام، كانت أغلبية الأجسام الصغيرة بالمجموعة الشمسية قد اقتنصتها الكواكب، ومن ثَم قلت حدة القصف النيزكى ولم يتبقَّ سوى بعض الاصطدامات العشوائية.

وخلال الثمانمائة مليون عام التى تلت ذلك، كان القمر موضعا لنشاط داخلى كبير. وقد أدت الحرارة الناجمة عن تحلل النويات المشعة الموجودة فى الصخور لانصهار الصخور الموجودة تحت السطح. وصعدت تلك الصخور بالتالى على شكل صُهارة وملأت الأحواض الشاسعة. وهكذا تكونت البحار القمرية التى يرجع لونها القاتم لطبيعة تلك الصخور. وخلال ثلاثة المليارات الأخيرة من السنوات، كان النشاط الداخلى أو النيزكى ضعيفا للغاية ويشهد بذلك سطح البحار الخالى تقريبا من الفوهات. أما عن الوجه الخفى، فهو يبدو

بلا بحار تُذكر. ويرجع ذلك فى الواقع إلى أن القشرة فى ذلك الوجه أكثر سمكا ومنعت الصهارة من الصعود للسطح.

البنية الداخلية للقمر

لقد كشفت مجسات الزلازل الموضوعة على سطح القمر عن عدة هزات داخلية ضعيفة للغاية. وترجع أغلبيتها على الأرجح لتعرض الكرة القمرية لانبعاجات تحت تأثير جاذبية كوكبنا، وأخرى سبَّبتها الاصطدامات النيزكية. وقد نشأ بعضها بشكل اصطناعى إبان البعثات الأمريكية، عندما كان رواد الفضاء يتعمدون إسقاط مراحل من الصواريخ على السطح. وقد أتاح تحليل كل تلك الهزات التكهن بالبنية الداخلية للقمر. وقد أظهر ذلك التحليل أن تابعنا مغطى بقشرة سميكة، تبلغ ستين كيلومترًا على السطح المرئى، وتصل لمائة كيلومتر على الوجه الخفى. ويوجد أسفلها وشاح سميك يزيد على الألف ومائة كيلومتر. وفى النهاية، فى المركز، توجد نواة صغيرة يبلغ قطرها نحو سبعمائة كيلومتر.

الصخور القمرية

ولقد أمكن الحصول على تحليلات شديدة الدقة للصخور القمرية نتيجة جلب نحو أربعمائة كيلوجرام من العينات القمرية للأرض. ويوجد على السطح مكونان مختلفان، وهما الصخور والغبار. والصخور موجودة بأحجام شديدة التباين، وهى تنقسم إلى شريحتين أساسيتين. البحار تتكون من البازلت وهى صخور دكناء مشابهة للصهارة الأرضية، أما المناطق الأخرى فتحتوى على (الأنورتوز)، وهى صخور ذات لون فاتح ومكونة من السيليكات، وتحتوى على كثير من الكالسيوم والألومنيوم.

وعلى السطح، نجد طبقة سميكة من الغبار، ويبلغ سمكها عدة سنتيمترات. ويبدو ذلك الغبار، المكون أساسا من بقايا الصخور، بلون رمادى أو بنى وفقا للإضاءة، ويتكون هذا الغبار نتيجة القصف الذى لا يتوقف للنيازك الدقيقة أو جزيئات الرياح الشمسية؛ وأيضا بسبب التقلبات الشديدة للحرارة والتى تؤدى

لانفجار الصخور. ونجد مباشرة تحت طبقة الغبار طبقة من الصخور المشقوقة، بسُمك يبلغ عشرة أمتار. ولتفادى تسمية تلك المواد "بالأرض"، فقد أطلق عليها اسم (الريجوليت).

نشأة القمر

يبعث على الدهشة أن مشكلة أصل القمر لم تزل حتى الآن موضع جدل. وقد سادت ثلاثة سيناريوهات لوقت طويل أمام هذا الجدال. السيناريو الأول هو الانشقاق. كانت الأرض فور نشأتها، عبارة عن كتلة سائلة تدور بسرعة كبيرة نسبيا. وبفعل قوة الطرد المركزى، فلعل كوكبنا قد لفظ جزءا من كتلته. وهذا الجزء تراكم ليولِّد القمر. أما السيناريو الثانى فهو سيناريو النشأة المتزامنة: فالأرض والقمر، وفقا لذلك السيناريو، قد يكونان نشآ بشكل متزامن من نفس مصدر الغبار. وأما السيناريو الثالث فهو سيناريو الاستيلاء، يفيد ذلك السيناريو بأن القمر نشأ فى منطقة مختلفة عن المجموعة الشمسية، لكن تم الاستيلاء عليه فى إحدى الفترات، عن طريق الجاذبية الأرضية.

فى الحقيقة، فإن أيًا من تلك النظريات القديمة لم يكن مقنعًا. فقد أظهر تحليل الصخور القمرية أن تكوينها الكيميائى يختلف عن تكوين صخور الأرض، لاسيما فيما يخص نسبة الحديد. لا مجال إذن لأن يكون القمر مقتصرا فى تركيبته على مواد منتزعة من الأرض، ولا مجال أيضا لأن يكون قد ولد فى نفس منطقة الأرض. فضلا عن ذلك، فإن السيناريو الأول يقتضى وجود سرعة دوران هائلة، والثانى عجز عن تفسير لماذا يمتلك القمر نواة أقل كثيرا من نواة الأرض. أما السيناريو الثالث والأخير فهو غير مقنع؛ لأنه من الصعب للغاية تخيل كيف أن الأرض تمكنت من اصطياد جسم ذى كتلة كبيرة مثل القمر وضمه فى مدار ثابت حولها. فضلا عن ذلك، فإن تحليل نسب مختلف النويات الذرية يكشف عن تشابه كبير بين الأرض والقمر، وهو أمر يصعب تفسيره للغاية لو أن الجسمين كانا قد ولدا بشكل منفصل.

ولذلك، طرح العديد من علماء الكواكب، فى عام ١٩٧٥، سيناريو رابعا أكثر تعقيدا لتوصيف أصل القمر. وتقول أطروحتهم إنه حدث على الأرجح، فى وقت مبكر فى تاريخ المجموعة الشمسية، اصطدام بين كوكب الأرض وجسم آخر فى حجم كوكب المريخ. ومن المرجح أن يكون ذلك الاصطدام قد أدى لتطاير كمية كبيرة من المادة تراكمت بعد ذلك مكونة القمر.

وتلك النظرية الأخيرة يمكنها تفسير كل الاختلافات والتشابهات بين الأرض والقمر، وهى بالتالى النظرية الأكثر قبولا اليوم. فعندما وقع الاصطدام، كان الجزء الأكبر من الحديد بالأرض كان قد تجمع بالفعل فى النواة؛ وبالتالى كانت المادة المنفصلة تنبع بشكل أساسى من القشرة الأكثر فقرًا فى الحديد، وهو ما يفسر أن القمر يحتوى على نسبة قليلة من هذا العنصر. أما تشابه نسب النويات الذرية المختلفة، فهو يرجع لحقيقة أن الجسمين لهما أصل مشترك. فى نهاية المطاف، فإن الطبيعة العشوائية للاصطدام تفسر لماذا أن الأرض هى الكوكب الداخلى الوحيد بالمجموعة الشمسية الذى يمتلك تابعا بمثل هذا الحجم الكبير.

كوكب المِرِّيخ

بعد الأرض، يوجد المريخ على مسافة نحو (١,٥٠) وحدة فلكية من الشمس. وعلى عكس الكواكب الأخرى، يتسم المريخ بفترة دوران حول محوره قريبة للغاية من فترة دوران الأرض، ويحدث تعاقب النهار والليل بالتالى بنفس الإيقاع مثلما على كوكبنا.

ويميل كذلك محور دوران المريخ بالنسبة لمستوى المدار له كذلك بمقدار قريب من حالة كوكبنا، وهو ما يجعل الكوكب خاضعا لدورة فصول مشابهة لفصول السنة فى الأرض، وإن كانت أبطأ قليلا، لأن السنة المِرِّيخية أطول من سنة الأرض.

ويبدو المريخ بوجه عام، برؤيته من الأرض، أحمر اللون مع بعض المناطق الدَّكْناء ومع مناطق قطبية بيضاء. ويتغير مظهره كثيرا مع تعاقب الفصول. ففى الصيف، تقل المناطق القطبية وتتسع المناطق الدكناء. وفى الشتاء، يكون الغطاء الأبيض على القطبين ملحوظا للغاية، وتكون المناطق الدكناء أقل وضوحا. وتتكون تلك المناطق الدَّكْناء من الصخور الدَّكْناء أساسًا، ويرجع تغير مظهرها على الأرجح إلى طبقة من الغبار لها سمك متغير بحسب الفصول. ويرجع المظهر الضارب إلى الحمرة إلى وجود أكسيد الحديد.

لقد بدأ فى عام ١٩٦٥ استكشاف المريخ بمركبات فضائية بتحليق من (مارينر ٤). وهو نفس ما قامت به مركبتان (مارينر) أخريان، ثم جاءت (مارينر ٩) واتخذت مدارا حول الكوكب واستمرت تلتقط صورا لمدة نحو عام. وفى عام ١٩٧٦، جاءت المركبتان (ڤايكينج) وقامتا بدراسة الكوكب لعدة سنوات. وكانت كل منهما مكونة من مركبات مدارية تلتقط صورًا للسطح وتدرس الغلاف الجوى، ومركبة رست على السطح وقامت بقياسات جوية وزلزالية وبتحليل بعض العينات من التربة؛ وبوجه خاص لاكتشاف أى أثر للحياة. وعلى عكس تلك النجاحات الواسعة، فقد شهد المريخ هو كذلك عدة إخفاقات كبرى؛ فى مقدمتها فشل المركبة (مارس أوبسرڤر) فى عام ١٩٩٣، وفشل هبوط (بيجل ٢) فى عام ٢٠٠٣.

الغلاف الجوى للمريخ

يبلغ قطر كوكب المريخ ستة آلاف وثمانمائة كيلومتر، ويمتلك غلافا جويا خفيفا للغاية، ويتسم بضغط جوى يقل عن واحد بالمائة من الضغط الجوى للأرض. ويتكون غلافه الجوى من الغازات الكربونية بنسبة تزيد على خمسةٍ وتسعين بالمائة، ومن قليل من النتروجين والأرجون والأكسجين مع نسب طفيفة من غازات أخرى. كما يوجد به قليل من بخار الماء بكميات كافيةٌ لتكوين سحب من الجليد أو لتكوين الضباب. وتُظْهر الصور الملتقطة من سطحه أن السماء تبدو برتقالية اللون، وهو ما يرجع على الأرجح لوجود جزيئات صغيرة من الغبار فى الغلاف الجوى.

وتتسم درجة الحرارة على سطح المريخ بأنها شديدة التغير، بين حد أدنى يبلغ نحو مائة وأربعين درجة تحت الصفر ليلاً، وحد أقصى بالنهار يتراوح بين درجة صفر شتاءً وعشرين درجة صيفا. وتثور بغلاف كوكب المريخ أحيانا عواصف عاتية تشمل كل الكوكب، ويمكنها أن تستمر لعدة شهور. ويكون السطح حينذاك مختفيا كليا بسبب الغبار الذى تحركه الرياح. وحدث ذلك على سبيل المثال فى بداية بعثة (مارينر ٩)؛ حيث أعاق هذا المناخ المركبة عن رصد السطح لعدة أسابيع.

سطح المريخ

وقد أوضحت الصور من مختلف المركبات سطحا مدهشا غنيا بتكوينات متنوعة: براكين خامدة، فوهات اصطدام، خوانق ومجارى أنهار جافة. وتلك التكوينات المختلفة ليست موزعة بانتظام على الكوكب؛ ولكنها مجمعة فى أحد نصفَى الكرة.

تسود فى نصف الكرة الشمالى للمريخ تكوينات بركانية الأصل. وتوجد بوجه خاص منطقتان تتركز فيهما العديد من البراكين: الهضبة البركانية المسماة (تارسيس)، وتحتوى على ثلاثة براكين يتجاوز ارتفاعها عشرين كيلومترًا. وفى الجانب الآخر من الكوكب (إليزيوم بلانيتيا). وقرب هضبة (تارسيس) يوجد جبل (أوليمبوس)، البركان الأكبر بالمجموعة الشمسية، والذى يقذف بحُمَمه لارتفاع ستة وعشرين كيلومترًا مع قاعدة يمتد قطرها لستمائة كيلومتر.

والبراكين المريخية هى من نفس نوع براكين هاواى مع منحدرات هابطة بميول طفيفة. وتُعزى لوجود بقعة ساخنة فى الوشاح تقذف الصهارة للخارج عبر القشرة. ويرجع حجمها الكبير، على الأرجح، إلى غياب الألواح التكتونية. فمن شأن الألواح التكتونية على كوكب الأرض، أن تجعل القشرة تغير من موضعها بالنسبة للبقعة الساخنة؛ الأمر الذى يؤدى إلى تتابع من البراكين الصغيرة. أما على المريخ، فالقشرة ثابتة وتراكم الصهارة فى نفس البقعة يشكل

شيئا فشيئا براكين هائلة. وانطلاقا من دراسة لعدد الفوهات فى تلك المناطق البركانية، أمكن تأريخها بشكل تقريبى. وتُعد هضبة (تارسيس) على سبيل المثال أصغر عمرًا نسبيًا، إذ لا يتجاوز عمرها عدة مئات من ملايين السنين فقط.

ونصف الكوكب الجنوبى مختلف للغاية، حيث تسوده فوهات اصطدام قديمة يبلغ عمرها عدة مليارات من السنوات. وعلى عكس الفوهات القمرية التى لا يتغير مظهرها مع الوقت، فإن الفوهات المريخية تخضع لعملية تعرية يسببها الغلاف الجوى الذى يغير شكلها ويجعل حوافها دائرية ويغطى داخلها بطبقة سميكة من الغبار.

ومن أبرز التكوينات على سطح المريخ أخدود عملاق قرب خط الاستواء يدعى سهل (مارينر)، تمجيدًا للمركبة (مارينر)، ويمتد لأكثر من ثلاثة آلاف كيلومتر بعمق يصل لثمانية كيلومترات، وهو محاط هو نفسه بمنظومة من الأخاديد ذات الحجم الأقل. ويعتقد علماء الكواكب أن تلك التكوينات هى نتاج انهيار هضبات هائلة الحجم.

ويتكون النوع الأخير من التكوينات المكتشفة على سطح المريخ، وبوجه خاص بجوار سهل (مارينر)، من سهول صغيرة بها العديد من التعرجات وتشبه مجارى نهرية جافة، وهو ما يبعث على الاعتقاد بأن ماضى المريخ شهد سريانا للماء السائل.

فلْنُنهِ ذلك التحليق السريع على كوكب المريخ بملاحظة أن الكوكب له تابعان صغيران؛ هما فوبوس وديموس بحجم يصل لنحو عشرة كيلومترات. هذان التابعان يبدوان غير منتظمين بالمرة تغطيهما الفوهات. وبفعل القرب من حزام الكويكبات، وبالنظر لشكلهما غير المنتظم، فإن علماء الفلك يتشككون بشدة فى أنهما كويكبان اقتنصهما المريخ بجاذبيته.

المياه على المريخ

فى العصر الحالى، لم يعد ثمة احتمال لوجود ماء سائل على المريخ لأن الضغط الجوى ضعيف للغاية؛ ومن ثَم أى سائل سيتبخر فورا. لكن فى حقبة

قديمة، تقدِّرها دراسة فوهات الاصطدام بنحو أربعة مليارات سنة، فإن الغلاف الجوى المريخى كان على الأرجح مشابهًا لغلاف كوكبنا وكان يسمح بوجود مياه سائلة.

غياب الألواح التكتونية

ويعتقد علماء الكواكب أن الاختلاف بين الكوكبين يُعزى إلى الألواح التكتونية. فبالنسبة لكل الكواكب الأرضية، يتكون الغلاف الجوى نتيجة الفورانات البركانية التى تعمل على تحرر الغازات المحتجزة فى الصخور منذ نشأتها. وهى تتكون أساسا من الغازات الكربونية (ثانى أكسيد الكربون) والنتروجين وبخار الماء، حيث يعمل الغاز الكربونى على تسخين الكوكب عن طريق تأثير الصوب؛ الأمر الذى يهيئ وجود المياه السائلة.

لكن ثمة ظاهرة أخرى تحدث من شأنها أن تبعث على التشكك فى كل شىء ؛ إنها انهمار الأمطار. فبما أن مياه الأمطار تذيب بسهولة الغاز الكربونى الموجود فى الغلاف الجوى، فإنها تحمله معها وتعيده سريعا إلى التربة. ويكون ذلك الماء سببا فى اختفائه هو ذاته. ففى الواقع، فعندما يقل مستوى الغاز الكربونى سيتسبب فى انخفاضِ الحرارة لأن تأثير الصوب يفقد حِدَّته، ويصبح الغلاف الجوى فى نهاية المطاف شديد البرودة بشكل لا يمكن معه وجود الماء السائل.

فى حالة الأرض، تعيد حركة الألواح التكتونية والنشاط البركانى ضخ الغاز الكربونى بشكل مستمر فى الغلاف الجوى، الأمر الذى يكفل التوازن والاستقرار السائدين. فى المقابل، بالنسبة للمريخ، يمنع غياب الألواح التكتونية إعادة ضخ الغاز الكربونى. وقد أنتج على الأرجح النشاط البركانى الأصلى غلافا جويا ظل موجودا لعدة عشرات الملايين من السنين، الأمر الذى أتاح للماء السائل تشكيل أنهار وسهول، لكن غياب الألواح التكتونية حَجَّم استمرار تلك الفترة.

الحالة الحالية للمياه على المريخ

فى العصر الحالى، فإن المياه لا تزال موجودة على المريخ، لكن ليس على هيئة سائلة. بدأ الأمر بوجود طبقة من الثلوج تحت التربة المريخية تسمى (البيرمافورست). وقد أرسلت لنا المركبات، على سبيل المثال، صورا لسطح المريخ تُظْهر بقايا الانزلاقات الأرضية وعلامات على تدفقات سائلة قديمة شديدة الأهمية. ويرجح أن تكون تلك التكوينات قد ظهرت عندما تعرض هذا الجَلِيد للتسخين فى الكوكب، سواء عن طريق البراكين أو بسبب اصطدامات النيازك، ثم ذاب الجليد واندفع للسطح مسببا انهيار الطبقات الخارجية.

وهناك أيضا مياه على شكل جليد فى المناطق القطبية. وقد رأينا أن تلك المناطق مغطاة بقلنسوات بيضاء يتغير حجمها بحسب الفصول. فى الواقع، تلك القلنسوات يبلغ سمكها نحو متر وتتكون من طبقتين مختلفتين: قلنسوة من جليد المياه وتعلوها قلنسوة من الجليد الكربونى. وحتى فى الصيف، تكون حرارة المريخ منخفضة للغاية بحيث أن المياه لا يمكنها أن تذوب وبالتالى تبقى دائما قلنسوة من جليد المياه، وتضاف إليها قلنسوة أخرى تتكون من الجليد الكربونى، ويتغير سمكها مع الفصول. فى الصيف، يكون الغاز الكربونى على هيئة غاز، ولا يشارك فى تغطية القطبين. وفى الشتاء، يتصلب ذلك الغاز ويغطى القلنسوة الأولى. ويكمن هنا مصدر التغيرات التى يرصدها الفلكيون منذ وقت طويل.

الاكتشافات الحديثة

لقد شهدت دراسة المياه على المريخ تسارعا مذهلا حديثا بفضل مركبة الفضاء الأوروبية (مارس إكسبريس)، التى استقرت فى مدار حول الكوكب فى الخامس والعشرين من ديسمبر عام ٢٠٠٣، وبفضل المركبتين الأمريكيتين روفر (سبيريت) و(أوبرتينيتي) اللتين وصلتا على التوالى فى الثالث ثم الخامس والعشرين من يناير ٢٠٠٤. وبعد نحو الشهر من دخول (مارس إكسبريس) فى مدارها، وبفضل أجهزة الأشعة تحت الحمراء (أوميجا)، المزودة بها، أكدت القياسات بشكل مباشر وجود جليد المياه فى القلنسوة القطبية الجنوبية، وقدَّرت

درجة تركيزه بشكل دقيق، وهو خمسة عشر بالمائة من الجليد الكلى. وبعد ذلك بقليل، كشفت كذلك وجود منطقة من (البيرمافورست) حول القلنسوة القطبية قد تمتد لمئات الكيلومترات المربعة.

ونجح الروفران الأمريكيان فى مباشرة البحث عن آثار للماء على السطح ذاته. وكان نجاح (أوبرتينيتي) هو الأعظم، وهى التى وصلت بمصادفة عجيبة إلى داخل فوهة صغيرة كانت تضم بروزات صخرية، وأتاحت بذلك منفذا مباشرا لما تحت التربة المريخية. وسرعان ما قادت تلك الصدفة إلى العثور على مؤشرات ذات دلالة كبيرة على وجود مياه فى الماضى بالمريخ من خلال مؤشرات كيميائية وفيزيائية. وبفضل المقياس الطيفى الخاص بها، نجحت الروفر فى البداية فى اكتشاف وجود كبريتات، وهى عناصر تدلل بشكل عام على أن صخرة ما قد نشأت فى المياه، أو تعرضت على الأقل للتغير بتعرض طويل للمياه. وكشفت الروفر كذلك آثارًا للبروم والكلور، وهما عنصران يظهران عندما تتراكم الترسيبات مع تبخر المياه الراكدة.

ويرتكز الخط الثانى من الدلائل على ثلاثة مظاهر فيزيائية للصخور، وهى وجود العديد من الفراغات الدقيقة، ووجود (كُريَّات) دقيقة واتجاه ميل بعض التعاريج على سطح الصخور. والفراغات الدقيقة التى تم رصدها هى فى المعتاد نتاج البلورات التى تتكون على الصخور فى وجود الماء المالح، والتى تختفى بعد ذلك بفعل عوامل التعرية أو التحلل فلا يبقى فى نهاية المطاف إلا فراغات دقيقة. أما الكريات المريخية، وهى جزيئات صغيرة على شكل كُرِّى، فيمكن أن تنتج عن عدة عمليات، لكن عودة ظهورها فى الطبقات الصخرية هى التى تؤكد فيما يبدو الأصل السائل لها. والمؤشر الأخير الفيزيائى هو وجود تعاريج فى الصخور بزاوية ميل مع اتجاه الطبقات الأساسية. ويمكن أن يكون لها عدة مصادر كذلك، لكن شكل التعاريج ينمُّ عن أن الصخور تكونت فى وجود مياه، على سبيل المثال عند حافة بحر قديم.

أما الروفر (سبيريت)، فقد هبطت على الجانب الآخر من الكوكب قرب فوهة (چوزيف). وكان نجاحها فى البحث عن آثار قديمة للمياه محدودا، لكنها نجحت رغم ذلك فى اكتشاف تصدعات فى صخرة بركانية وبقايا آثار ربما تنم عن مرور كميات محدودة من المياه.

استكشاف المريخ بعد عام ٢٠٠٠

أُطلقت المركبة (مارْس أوديسًى) فى السابع من أبريل عام ٢٠٠١ واتخذت مدارا حول المريخ فى الرابع والعشرين من أكتوبر عام ٢٠٠١، ولا زالت تعمل حتى الآن. وكانت مَهمَّتها الرئيسة هى دراسة توزيع المعادن على سطح الكوكب؛ وبشكل خاص المعادن التى يرجح أن تكون تشكلت فى وجود مياه، وبحث وجود عشرين عنصرا كيميائيا ودراسة الإشعاعات الشمسية على مستوى المريخ. ومن أولى النتائج التى حصلت عليها فى عام ٢٠٠٢ اكتشاف كميات كبيرة من الهيدروجين المختزن تحت التربة فى الكوكب وربما ثلوج مائية.

وفى الثانى من يونيه ٢٠٠٣، أقلعت المركبة الأوروبية (مارس إكسبريس) ووصلت المريخ فى الخامس والعشرين من ديسمبر ٢٠٠٣. وتمثلت مهمتها فى إجراء مسح طبوغرافى لسطح المريخ ودراسة توزيع المعادن به، وتحليل تكوين التربة التحتية المريخية على عمق عدة كيلومترات، وأيضًا دراسة الغلاف الجوى للمريخ، وبشكل خاص دوراته الشاملة وتفاعله مع التربة والرياح الشمسية. وكان الكشف الأول لها، إبان عمليات الرصد الأولى للقلنسوة القطبية الجنوبية فى عام ٢٠٠٤، هو البرهنة بشكل مباشر على وجود جليد المياه.

وتم إطلاق الروفريْن (سبيريت) و(أوبرتينيتى) على التوالى فى العاشر من يونيه والسابع من يوليو ٢٠٠٣، وهبطا تباعا على سطح المريخ فى الرابع ثم فى الخامس والعشرين من يناير ٢٠٠٤. ووصلت (سبيريت) فى فوهة (چوزيف)، وهى فوهة بقطر مائة وستين كيلومترا، تشكلت منذ ثلاثة أو أربعة

مليارات من السنوات بميل خمس عشرة درجة جنوب خط الاستواء المريخى. وقد تم اختيار الفوهة لاحتمال أن تكون موقعا لبحيرة قديمة. ووصلت (أوبرتينيتي) فى فوهة صغيرة يبلغ قطرها اثنين وعشرين مترا، وتدعى (إيجل) في سهل (ميريديانى بلانيوم) على خط يميل درجتين جنوب خط الاستواء، لكن فى الناحية الأخرى من الكوكب. وتم اختيار ذلك الموقع لأن عمليات الرصد المدارية كانت قد كشفت عن وجود (الهيماتيت) به، وهو معدن يتكون بشكل عام فى وجود المياه. وما زال الروفران يواصلان مهمتهما (فى أغسطس عام ٢٠٠٩)، على الرغم من أن مهمتهما الأصلية كان مخططا لها أن تمتد لنحو تسعين يوما فقط.

وقد جمع الروفران كمية مذهلة من المعلومات والصور. ولم تجد (سبيريت) أدلة على وجود بحيرة قديمة فى موقع هبوطها، لكنها وجدت مجرد سهل من البازلت. لكن بعد التحرك صوب مرتفعات تقع على بعد ثلاثة كيلومترات من هذا الموقع، كشفت أدلة كيميائية ومورفولوجية لتاريخ جيولوجى أكثر تعقيدا، ينطوى على الأرجح على احتمالات لوجود مياه. وكانت (أوبرتينيتى) أوفر حظا حيث هبطت منذ وصولها على بروزات صخرية، أكد تحليلها أن الصخور مرت بمراحل تغيير نتيجة التعرض لكميات هائلة من المياه. وفى وقت لاحق، نزلت الروفر فى فوهة (إندورانس) التى يبلغ قطرها مائة وثلاثين مترا، واكتشفت بها قطاعا رأسيا بامتداد عشرة أمتار، كشف أيضا عن تغيرات تدريجية فى التكوين الكيميائى والمورفولوجى للصخور.

واتخذت المركبة (مارس روكنسونس أوربيتر)، التى تم إطلاقها فى الثانى عشر من أغسطس عام ٢٠٠٥، مدارا حول الكوكب فى العاشر من مارس عام ٢٠٠٦. وكانت مهمتها تتمثل فى تقديم خرائط مصورة لسطح المريخ بدرجة نقاء لم يسبق لها مثيل حتى ذلك الوقت، ودراسة تكوين القلنسوتين القطبيتين والبحث عن أدلة على وجود مياه فى التربة التحتية ودراسة الغلاف الجوى والأحوال الجوية العامة بالمريخ.

وتم إطلاق (فونيكس) فى الرابع من أغسطس عام ٢٠٠٧، وهبطت عند خط طول يميل بمقدار ثمانٍ وستين درجة فى المنطقة القطبية الشمالية فى الخامس والعشرين من مايو ٢٠٠٨، وظلت تؤدى مهمتها حتى العاشر من نوفمبر عام ٢٠٠٨. وكان هدفاها الأساسيان هما دراسة التاريخ الجيولوجى للمياه فى تلك المنطقة، واستكشاف ما إذا كانت التربة شهدت، أو كانت مهيأة لوجود شكل من أشكال الحياة. ورغم قصر رحلتها، جمعت (فونيكس) مجموعة هائلة من المعلومات. فقد رصدت بشكل خاص مادة بيضاء اللون تتبخر فى أربعة أيام، ويرجح أن تكون هذه المادة ثلج ماء مختزنا تحت التربة ويتحول بشكل مباشر من الحالة الصلبة للحالة الغازية. وكشفت بعض الصور لأقدام المركبة ذاتها أيضا ما يمكن أن يكون قطرات من الماء تكثفت عليها بعد تسربها من تحت التربة إبان الهبوط على السطح، لكن لم يتم التوافق على ذلك التفسير. وكانت المهمة تتضمن أيضا تقديم دراسات لكيمياء التربة وإجراء تجارب لحالات الطقس الجوى.

الكُوَيْكبات

إن المجموعة الشمسية لا تتكون فقط من الكواكب والأقمار، فهى تضم أيضا العديد من الأجسام ذات الحجم الأصغر، وهى الكويكبات والمذنبات وأجسامًا صغيرة تدعى الأحجار النيزكية. لا يكمن وجه تباين الكويكبات عن المذنبات فى حجمها ولكن فى بُعدها عن الشمس وتكوينها. فالكويكبات موجودة داخل مدار المشترى، وتتكون من الصخور، فى حين أن المذنبات تكون موجودة بوجه عام فى مناطق أبعد كثيرا، وتتكون من الثلوج والغبار.

والآن وقد عبرنا كوكب المريخ، فلنتناول الكويكبات. فى عام ١٨٠١، اكتشف الفلكى الصقلى جيسيب بيازى جرما سماويا مجهولا كان يتحرك فى السماء، وكان المفترض بالتالى أن يكون منتميا إلى المجموعة الشمسية. وسرعان ما تبين أن هذا الجرم، المعروف اليوم باسم (سيريس)، يدور حول الشمس على مسافة (٢,٩) وحدة فلكية بين المريخ والمشترى. وتلا ذلك

اكتشافات أخرى: (بالاس) فى عام ١٨٠٢ و(جونو) فى عام ١٨٠٤ و(ڤيستا) فى عام ١٨٠٧. وبدءًا من النصف الثانى من القرن التاسع عشر، ازدادت حالات رصد أجسام من ذلك النوع بسرعة شديدة. ونحن نعرف اليوم الآلاف منها، ويقدر علماء الكواكب أنه يوجد مائة ألف كويكب يلمع بما يكفى لكى نتمكن من رصدها يوما ما من الأرض.

وفى الغالبية العظمى من الحالات، فإن مدار الكويكبات يكون محصورا بين مدارَى المريخ والمشترى، وبشكل أكثر دقة، بين (٢) و(٣,٥) وحدة فلكية، فى مكان أُطلق عليه فيما بعد اسم حزام الكويكبات. ويتراوح حجم تلك الأجسام بين عدة مئات من الكيلومترات بالنسبة لبعض الأنواع النادرة مثل (سيريس) وبين قيمة فى حدود المتر . لأنه إذا قل الحجم عن ذلك فسوف يدخل الجسم فى نطاق الأحجار النيزكية، وهى أجسام ذات أشكال غير منتظمة وتتكون من الصخور والمعادن مثل الكواكب الصخرية.

نشأة الكويكبات

كانت الفرضية الأولى فيما يتعلق بأصل الكويكبات هى نظرية انفجار أحد الكواكب بين كوكبَى المريخ والمشترى، وأن تلك الأجسام الصغيرة هى بقاياه. غير أنه تم استبعاد تلك الفكرة بعدما تبين أن الكتلة الكلية للكويكبات لا تسمح إلا بتشكيل كوكب صغير للغاية، لا يزيد قطره على نصف قطر القمر.

ويميل علماء الكواكب اليوم إلى النظرية التى تقول بأن الكويكبات هى أجسام لم تنجح فى التراكم لتشكل كوكبا، بسبب تأثير المشترى. أحد الأدلة على صحة تلك النظرية هو وجود ثقوب فى توزيع المدارات فى حزام الكويكبات. فى الواقع، فإن المدارات التى قد تكون فترة دورانها حول الشمس مساوية لكسر بسيط، مثل النصف أو الثلث، من فترة دوران المشترى، تكون فارغة.

فلنتخيل جسما ما فى مدار حول الشمس له فترة دوران تعادل نصف فترة دوران المشترى. ففى كل مرة يقوم الكوكب بدورتين، فإنه سيعود بين الشمس

والمشترى بشكل متكرر ومتطابق تماما. الشد الجذبوى للكوكب العملاق سوف يعمل إذن بنفس القوة وبوجه خاص فى نفس الاتجاه. إن ذلك التكرار وذلك التراكم للتأثير المتماثل من شأنهما أن يسفرا عن تأثير ناجم عنهما على الجسم، ويتمثل فى: انحراف فى مساره وتغير فى زمن الدوران. إن مثل تلك الظاهرة لا يمكنها أن تحدث إلا لو كان هناك تراكم منتظم خلال فترة طويلة للغاية، بمعنى أن فترة دوران الجسم، والمشترى تربطهما على وجه التحديد علاقة كسر على نحو ما أسلفنا. إن تلك الظاهرة المسماة "الصدى" هى التى تفسر الثقوب فى التوزيع الحالى لمدارات الكويكبات.

إن ظاهرة الصدى هى على الأرجح السبب فى عدم تكوُّن كوكب أرضى خامس بين المريخ والمشترى. فى الواقع، لقد تشكلت الكواكب منذ (٤,٦) مليار سنة، عن طريق تراكم الغبار فى أجسام صغيرة تدعى الكواكب الأوَّلية. هذه بدورها تجمعت لتشكل أجساما ثقيلة. وعلى صعيد ما كان سيشكل فيما بعد حزام الكويكبات، فإن جزءا كبيرا من هذه الكواكب الأولية ربما كان خاضعا لظاهرة "الصدى" مع المشترى، لكونه أكبر كواكب المجموعة الشمسية كتلة، لينتهى الأمر بهذه الكواكب الأولية بأن تُلفظ من تلك المنطقة. إن ذلك يفسر لماذا لا يوجد كوكب أرضى خامس، لكن يوجد بدلا منه العديد من الأجسام الصغيرة التى تتسم بكتلة كلية ضعيفة نسبيا.

وإذا كانت الغالبية العظمى من الكويكبات تقع فى منطقة الحزام بين المريخ والمشترى، فإنه ثمة عدة استثناءات جديرة بالملاحظة. فبعض تلك الكويكبات يزور أحيانا المناطق الواقعة داخل مدار المريخ (مجموعة كويكبات أمور) أو مدار الأرض (مجموعة أبوللو). وبعض الكويكبات يسكن بشكل دائم داخل المدار الأرضى (مجموعة أتين). وبالعكس، فإن ثمة كويكبات تمضى الفترة الأكبر من حياتها بعد مدار زحل، مثل (شيرون) على سبيل المثال. ويمكننا أن نجد أيضا كويكبات تدعى كواكب طروادة تتبع نفس مدار المشترى لكن متقدمة عليه أو متأخرة عنه بفارق ستين درجة بالنسبة للكوكب. ويبلغ عدد

ما تم رصده من الكويكبات الطروادية نحو خمسين واحدا، لكن من المرجح أن يكون هناك أكثر من ذلك بكثير.

النيازك

فضلاً عن الكويكبات، فإن المجموعة الشمسية عامرة بعدد لا يُحصى من الأجسام ذات الحجم الأصغر والتى لا يزيد قطرها على متر، وتدعى النيازك. ونظرا لحجمها الضئيل، فإن تلك الأجرام غير مرئية بالمرة من الأرض. ونحن لا نلحظ وجودها إلا حين يدخل أحدها فى الغلاف الجوى للأرض ويتعرض للاحتكاك بالغلاف الجوى على ارتفاع نحو مائة كيلومتر؛ فترتفع درجة حرارته وينتهى به الأمر بأن يحترق. تلك الظاهرة تُنتج ذيلا ضوئيا يدعى الشهاب أو النيزك، وهى من أجمل مشاهد السماء فى الليل.

وإذا لم يحترق الحجر النيزكى بشكل كلى نتيجة مروره فى الغلاف الجوى، فإن بقاياه وتدعى النيازك قد تصل إلى سطح الأرض. ولو كانت تلك البقايا ذات حجم كبير، وهو أمر نادر، يكون الاصطدام بسطح الأرض عنيفا للغاية ويؤدى لنشأة فوهة نيزكية. وإذا كانت تلك الفوهات النيزكية موجودة بأعداد كبيرة على سطح أجرام مثل عطارد أو القمر، فإنها نادرة للغاية على الأرض بسبب التآكل وحركة الألواح التكتونية. وقد تكون حفرة الأريزونا هى المثال الأشهر حيث يزيد قطرها على الكيلومتر، ونتجت عن اصطدام نيزك يبلغ قطره خمسين مترًا بالأرض، منذ ما يزيد على تسعة وأربعين ألف عام.

وتتكون معظم الأحجار النيزكية من بقايا الكويكبات أو المذنبات، لكن بعضا منها لها أصل يبعث على الدهشة. فقد تم اكتشاف أحجار نيزكية تماثل فى تركيبتها الصخور المنقولة من القمر، ومن المرجح بالتالى أن تكون واردة من القمر ذاته. بل إن الأكثر جذبا للانتباه أن عشرات النيازك التى تم العثور عليها فى إنتركتيكا تبين أن لها تكوينا كيميائيا مماثلا لما يتوقع علماء الكواكب العثور عليه فى الصخور المريخية، وأنها تحتوى على آثار غازات من الغلاف

الجوى للكوكب الأحمر. الأمر إذن يتعلق على الأرجح بصخور لفظها المريخ منذ مائة وثمانين مليون عام إبان انفجار بركانى هائل.

وأغلبية الأحجار النيزكية تتكون من صخور، وبعضها يتكون من حديد وقليل منها يتكون من مزيج من الاثنين. وتتعرض هذه الأحجار بصفة عامة خلال وجودها لارتطامات واندماجات تؤدى إلى تغير تركيبها وتكوينها الكيميائى. ومع ذلك، بعض النيازك النادرة التى تم العثور عليها على سطح الأرض وتدعى (كوندريت كربونية) لم يجد بها العلماء أى أثر لتغيير فى تكوينها. المثال الأشهر لذلك هو نيزك (أليند) الذى انفجر فوق المكسيك فى عام ١٩٦٩ ونثر نحو خمسة أطنان من الصخور على عدة مئات من الكيلومترات المربعة. ذلك النوع من الأحجار النيزكية يمثل مصدرًا مهمًا للغاية للمعلومات حول تكوين المجموعة الشمسية إبان نشأتها.

تفلطحه الشديد الناجم عن سرعة دورانه المذهلة. فالكوكب يدور فى الواقع حول نفسه دورة كاملة فى أقل من عشر ساعات، وهو أمر مذهل نظرًا لحجمه الضخم!

لقد تم الحصول على أولى المعلومات المنطقية حول المشترى عن طريق المركبة (بيونير ١٠) فى عام ١٩٧٣، و(بيونير ١١) عام ١٩٧٤، ثم بعد ذلك (فواياجير ١) و(فواياجير ٢) فى عام ١٩٧٩. لقد قدمت تلك المركبات، بوجه خاص، تحليلا طيفيا متقدما أكد أن الكوكب يتكون بشكل أساسى من الهيدروجين (اثنان وثمانون بالمائة من الكتلة الكلية)، والهليوم (سبعة عشر بالمائة) مع نسب طفيفة لعدة عناصر أخرى مثل الميثان أو الأمونيا. كما كشفت أيضا عن وجود حلقة رفيعة للغاية على مستوى خط استواء المشترى تتكون من الغبار والصخور الصغيرة. وحلقت أيضا فوق الكوكب المركبات (أوليس) فى عام ١٩٩٢، و(كاسينى) فى عام ٢٠٠٠، لكن الحصاد الأكبر تم تحقيقه حديثا بفضل رحلة جاليليو.

لقد تم إطلاق المركبة "جاليليو" فى عام ١٩٨٩ عن طريق المكوك (أطلنتس)، ووصلت للمشترى فى عام ١٩٩٥ واتخذت مدارا حوله. واستمرت البعثة حتى عام ٢٠٠٣ حيث اضطرت المركبة إلى تحويل مسارها نتيجة نفاد الوقود ودخلت فى الغلاف الجوى للمشترى حيث تفتَّتت. وعلى مدى تلك الأعوام الثمانية من الرصد، جمعت "جاليليو" كَمًّا رائعًا من المعلومات حول الغلاف الجوى للمشترى وغلافه المغناطيسى ونظام الحلقات به وأقماره. وفضلا عن ذلك، لدى وصولها للمشترى انفصلت مركبة أصغر من الجسم الرئيس للغوص نحو الكوكب وإجراء دراسة مباشرة لغلافه الجوى وبوجه خاص سحبه ورياحه. وقد نجحت تلك المركبة الصغيرة فى البقاء لمدة خمس وسبعين دقيقة قبل أن تُسحق بالضغط الجوى.

البنية الداخلية والغلاف الجوى

لقد تم تحديد التكوين الداخلى لكوكب المشترى بفضل أنواع مختلفة من الرصد. إن شكل الانبعاج الذى يبدو عليه الكوكب نتيجة نمط دورانه حول

نفسه أتاح تقرير وجود نواة صخرية به، يبلغ نصف قطرها نحو عشرة آلاف كيلومتر. وبعد النواة، توجد طبقة من الهيدروجين السائل بسمك نحو أربعين ألف كيلومتر ولكن تتسم بخصائص المعدن؛ إذ تحت تأثير ضغط هائل - أكثر من ثلاثة ملايين مرة مثل الضغط الجوى الأرضى - لم تعد الإلكترونات متصلة بالنويات ويمكنها التحرك بحرية، كما يمكنها نقل الحرارة والكهرباء وتوليد مجال مغناطيسى، ويمكن القول باختصار، إن الهيدروجين السائل يكتسب خصائص المعدن. وأعلى طبقة الهيدروجين توجد طبقة أخرى يبلغ سمكها عشرين ألف كيلومتر تتكون من الهيدروجين الجزيئى السائل غير المعدنى. وينتهى الأمر، قرب السطح، بطبقة رقيقة للغاية من الهيدروجين الجزيئى الغازى بسمك نحو ألف كيلومتر.

وتنتمى كل التكوينات المرئية على سطح المشترى، وبوجه خاص البقعة الحمراء، إلى المائة كيلومتر الأولى من الطبقة الغازية. وقد قادت عملياتُ الرصد التى قامت بها المركبات، علماءَ الكواكب لطرح تكوين من ثلاث طبقات لتلك الكيلومترات المائة الأولى. بالغوص للداخل، نلتقى فى البداية بسحب من بللورات الأمونيا ثم بسحب من حَمْض كبريت الأمونيا، وفى النهاية سُحُب من جليد المياه. ويُعد ذلك التكوين الطبقى مصدر الطابَع الملون للكوكب، لأن كل طبقة تمتلك لوناً خاصا، وهى بالترتيب الأحمر والأبيض والبنى.

وترتبط ألوان كل منطقة بالمشترى بارتفاع السحب فيها، أى بمقدار الضغط السائد فيها. ويرتبط شكل الدوائر الكبيرة المتوازية بخط الاستواء بسرعة الدوران الكبيرة للمشترى. وتتكون بالتبادل من غازات ساخنة قادمة من الداخل مسببة رؤية السحب البيضاء بالطبقة المتوسطة، ومن غازات أكثر برودة تندفع للداخل كاشفة بهذا الشكل السحب البنية الأكثر عمقا. ويتداخل مع هذا التكوين بقع بيضويَّة مختلفة الألوان، وهى فى الحقيقة أنواع من الأعاصير. ويرتهن لون تلك البقع كذلك بعمق السحب المرئية. فالبقعة الحمراء من هذا المنطلق تمثل تكوينا من السحب الأكثر ارتفاعا، وتظهر بالتالى حمراء اللون.

وبدراسة الإشعاع القادم من المشترى، لاحظ علماء الكواكب ظاهرة تسترعى الانتباه: إن الكوكب العملاق يبعث من الطاقة ما يزيد بمقدار مرة ونصف عما يتلقى. ومن شأن تلك الخاصية أن تفسر لماذا تزيد الحرارة حين ندخل فى غلافه الجوى، وكيف أنها سبب توزيع الطبقات السحابية. وتُعزى هذه الظاهرة على الأرجح إلى أن المشترى ما زال فى حالة تحرير للطاقة المتراكمة به وقت نشأته.

أقمار المشترى

يدور حول كوكب المشترى ما لا يقل عن واحد وستين تابعا. وقد اكتشف جاليليو الأربعة الرئيسة منها عام ١٦١٠، وهى: إيو وأوروبا وچانيميد وكاليستو بالترتيب التصاعدى للمسافة، والاثنان الأولان حجمهما كبير مثل القمر والاثنان الآخران بمثل حجم عطارد. وقد أرسلت لنا المركبتان (فواياجير) فى عام ١٩٧٩ ثم المركبة (جاليليو) بين عامَىْ ١٩٩٥ و٢٠٠٣ صورًا جذابة لتلك التوابع، وكشفت لنا عن أربعة عوالم شديدة الاختلاف.

يقع القمر إيو، وهو الأقرب للمشترى من مجموعة الأقمار الأربعة التى اكتشفها جاليليو، على مسافة أربعمائة وواحد وعشرين ألف وستمائة كيلومتر من الكوكب، ويبلغ قطره ثلاثة آلاف وستمائة وثلاثين كيلومترًا. ويُعد إيو موضع نشاط بركانى قوى، ينتج كمية كبيرة من المعادن الغنية بالكبريت، والتى تضفى على القمر مظهر الاصفرار والاحمرار.

ويرجع النشاط البركانى إلى قوى المَدِّ الناجمة عن التفاعل الجذبوى المشترك من المشترى وأوروبا وچانيميد. وتعمل تلك القوة، بشكل دورى، على تغيير شكل قلب القمر إيو، وعلى إخضاعه لقوى احتكاك تسخنه، وتنتقل الحرارة الناجمة عن ذلك للخارج عن طريق البراكين، الأمر الذى يجعل سطح إيو فى حالة تجدد مستمر للفوهات البركانية، أما فوهات الاصطدام النيزكى فهى نادرة.

بعد ذلك، يقع القمر أوروبا على مسافة ستمائة وسبعين ألف وتسعمائة كيلومتر من المشترى، ويبلغ قطره ثلاثة آلاف ومائة وثمانية وثلاثين كيلومترًا. يتسم القمر أوروبا بسطح شديد النعومة، يتكون من جليد المياه دون بروزات ظاهرة لكن يتخلله العديد من الشقوق التى تمتد لآلاف الكيلومترات. يمكن تفسير تلك الخصائص إذا تصورنا أن السطح تعرض فى فترة قديمة للذوبان عن طريق قوى المد والجزر قبل أن يتجمد على هذه الهيئة بما فيها من تصدعات كبيرة. ومن الوارد أن تكون قوى المد والجَزْر هذه ما زال من شأنها أن تخلق ما يكفى من الحرارة لكى تسمح بوجود محيط سائل تحت القشرة المجمدة، وهو ما قد يفسح المجال لاحتمال وجود أحد أشكال الحياة تحت السطح.

القمر الكبير الثالث هو جانيميد على مسافة (١,٠٧) مليون كيلومتر ويبلغ قطره (٥٢٦٨) كيلومترًا، الأمر الذى يجعله أكبر أقمار المجموعة الشمسية. ويمتلك جانيميد سطحًا من لونين، حيث نجد فى البداية مناطق قاتمة مغطاة بالفوهات، وبالتالى فإنها قديمة للغاية، وهى على الأرجح آثار السطح الأصلى. وتوجد بخلاف تلك المناطق القاتمة مناطق ذات لون فاتح تقل فيها الفوهات، لكن يتخللها العديد من الشقوق المتوازية. وتتشكل تلك المناطق الواضحة، على الأرجح، من معادن آتية من جوف القمر ثم انتشرت فيما يبدو على السطح تحت تأثير محتمل لوجود ألواح تكتونية.

وعلى مسافة (١,٨٨٣) مليون كيلومتر من المشترى، نلتقى فى النهاية بالقمر كاليستو الذى يبلغ قطره أربعة آلاف وثمانمائة وستة كيلومترات. وبالعكس من التوابع الكبيرة الأخرى، فإن سطح كاليستو قاتم وذو شكل منتظم ومغطى بشكل كامل بفوهات الاصطدام. ويخضع كاليستو، بسبب بعد مسافته عن المشترى، لقوى مد وجزر أضعف من حالة باقى التوابع الأربعة، وبالتالى لا يتجدد سطحه الأصلى بتفاعلات داخلية.

زحل الكوكب المتأنق

بعد المشترى نصل إلى كوكب زحل الذى يدور حول الشمس على مسافة نحو (٩,٥) وحدة فلكية. وزحل هو ثانى الكواكب فى الحجم بقطر يبلغ مائة وواحدًا وعشرين ألف كيلومتر، وهو معروف بوجه خاص بحلقاته الجميلة. ويدور زحل مثل شأن المشترى بسرعة هائلة حول محوره، حيث يُتم دورته فى نحو عشر ساعات، ويتكون بشكل أساسى من الهيدروجين والهليوم، ويدلل على ذلك كثافته الضعيفة التى لا تزيد على (٠,٦٩) من كثافة الماء.

لقد تمت دراسة الكوكب تفصيليا عن طريق ثلاث مركبات؛ هى (بيونير ١١) فى عام ١٩٧٩ و(فواياجير ١) فى عام ١٩٨٠ و(فواياجير ٢) فى عام ١٩٨١. وقد كشفت تلك المركبات عن مدى تعقيد الحلقات، والتقطت صورا عالية الدقة للسطح المرئى لزحل. وقد ظهر ذلك السطح أقل تلونا بكثير مقارنة بالمشترى، رغم وجود دوائر متوازية تميل إلى اللون الأصفر عند خط الاستواء، وبعض البقع البيضاء.

ويتسم زحل بتكوين داخلى يشبه حالة المشترى، مع تفلطح أكبر، ينمُّ عن أن نواته الصخرية أكبر حجما. ومن ناحية أخرى، يؤكد المجال المغناطيسى الأضعف من جانبه على أن طبقة الهيدروجين المعدنية أقل سمكا. ويشبه الجزء الخارجى الأعلى من الغلاف الجوى نظيره فى المشترى تماما بطبقاته الثلاث؛ فضلا عن تركيبة الشرائح الدائرية المتوازية عند خط الاستواء. ويرجع نقص الألوان وقلة درجة الوضوح إلى ضعف الجاذبية لزحل قياسا بالمشترى، وهو ما يؤدى إلى انتشار الطبقات الثلاث على مسافة مئات الكيلومترات بدلا من العشرات فى حالة المشترى. من ثَم فإن الطبقات العميقة به تبدو مغطاة بمئات من الكيلومترات من الغيوم.

ويطلق كوكب زحل، مثل جاره، من الطاقة أكثر مما يتلقى، ولكن بنسبة تصل أحيانا إلى مرتين ونصف المرة. غير أن ذلك فى حالة زحل لا يرجع على الأرجح للطاقة المتراكمة داخله منذ فترة النشأة، لكنه يُعزى بالأحرى لسقوط الهليوم نحو داخل الكوكب، بما يشبه سقوط الأمطار على الأرض. ومن شأن

تلك التحركات أن تحول الطاقة الجذبوية إلى حرارة، وأن تفسر كذلك سِرَّ ضعف تركيز الهليوم فى الطبقات الخارجية.

الحلقات

لقد تم رصد حلقات زحل للمرة الأولى عن طريق جاليليو عام ١٦١٠، حيث ظن أنها قمران للكوكب. ووصفها كريستيان هيجن بأنها حلقة وحيدة عام ١٦٥٥. ولم يتم التعرف عليها على هيئة حلقات متعددة إلا بعد ذلك بأعوام وبوجه خاص عن طريق الفلكى كاسينى فى عام ١٦٧٥، والذى اكتشف حالة الانقطاع فى هذه الحلقات التى تحمل اسمه.

والحلقات لها قطْر خارجى يبلغ نحو ستمائة ألف كيلومتر وسُمك يبلغ بالكاد كيلومترين. وتظهر الصور الفوتوغرافية الملتقطة بالمركبات أن الحلقات الأكبر نسبيا والتى يمكن رؤيتها من الأرض هى فى الواقع مكونة من عديد من الحلقات الرفيعة شديدة القرب من بعضها البعض. وتتكون تلك الحلقات الرفيعة هى نفسها من الآلاف من الأجسام الصغيرة الصلبة المستقلة، التى تدور حول الكوكب بسرعة تزداد كلما كانت أقرب إلى السطح. وتتكون تلك الأجسام فى المقام الأول من الثلوج أو من الصخور المغطاة بالثلوج. ويتراوح حجمها بين المليمتر وعدة عشرات من الأمتار.

ويعتقد علماء الكواكب أن الحلقات هى نتيجة انفجار أحد الأقمار إثر اقترابه بشدة من زحل. فلنتخيل فى الواقع أن جسما ذا حجم كبير "غامَر" بالاقتراب بشدة من الكوكب. فى ذلك الوضع لن تكون كل نقاط الجسم على نفس البعد من زحل، وبالتالى ستكون معرضة لقوى جذبوية متباينة، تتعاظم فيما بين الوجهين القريب من الكوكب والمقابل له. والنتيجة الإجمالية هى أن الجسم سيكون معرضا لقوة تعمل على استطالته بل تمزيقه - إننا نتحدث هنا عن قوة المَدِّ لأن هذه الظاهرة ذاتها هى التى تفسر ما تتعرض له الأرض من تغيرات تتسبب فى حدوث المد والجزر. ويحدث الانفجار حين تصبح قوة المد أكبر من قوة تماسك الجسم، وهو ما يحدث حين يصل الكوكب لمسافة صغرى

تدعى حد (روش). وتجدر الإشارة إلى أن قوى المد لا زالت موجودة حتى أيامنا الحالية وتمنع بقايا الانفجارات من الالتحام لتشكيل جسم جديد.

وزحل محاط بعشرين قمرًا، ومنها ما يتفاعل مع الحلقات. ويُعد القمر ميماس، في هذا السياق، سبب أكبر حالة انقطاع في الحلقات والمعروفة باسم انقطاع كاسيني. ولو كان ثمة أجسام موجودة في ذلك الانقطاع لكانت فترة دورانها نصف فترة دورة ميماس. وهذا يعني أن ظاهرة تأثير الصدى كانت سائدة مثل تلك التي تؤثر على الكويكبات والمشتري؛ الأمر الذي أثر على مدار تلك الأجسام. وثمة توابع أخرى تدعى بالرعاة لها تأثير معاكس؛ حيث تميل إلى تهيئة وضع بعض الأجسام الصغيرة في مدارات محددة.

رحلة بالمركبة كاسيني – هيجن

لقد تحققت طفرة هائلة في معرفتنا بزحل وتوابعه بفضل بعثة (كاسيني- هيجن)، وهي نتاج التعاون بين وكالة ناسا الأمريكية والوكالة الفضائية الأوروبية. وتم إطلاق تلك المركبة في أكتوبر عام ١٩٩٧، ووصلت إلى زحل في يوليو عام ٢٠٠٤. وتُعد هذه البعثة هي النموذج الأمثل لرحلة البلياردو بين الكوكبية حتى اليوم، بما أنها استُخدمت لاستطلاع عدة كواكب: كوكب الزهرة مرتان والأرض مرة، وأخيرًا المشتري في عام ٢٠٠٠.

لقد اعتمدت تلك البعثة على آلتين: مركبة مدارية تدور حول زحل منذ عام ٢٠٠٤ ومركبة تغوص في الغلاف الجوي للقمر تيتان. المركبة المدارية التي تحمل اسم كاسيني تدرس الغلاف الجوي لكوكب زحل، وبوجه خاص رياحه القوية ونظام حلقاته ومجاله المغناطيسي. كما تقوم أيضا بالتحليق عن قرب فوق مختلف التوابع الجليدية، وبوجه الخصوص القمر تيتان الذي رصدت غلافه الجوي وسطحه. أما المركبة التي تحمل اسم هيجن فقد وصلت إلى القمر تيتان في يناير عام ٢٠٠٥. ودرست تكوين الغلاف الجوي للقمر خلال هبوطها عليه، والذي استغرق ساعتين ونصف الساعة. كما قامت أيضًا بدراسة سطحه. وقد أطلق اسم المركبتين تكريما لاثنين من علماء الفلك من القرن السابع عشر، وهما الهولندي كريستيان هيجن الذي اكتشف تيتان، والذي كان

أول من علم أن زحل محاط بحلقات، والإيطالى چون دومينيك كاسينى، الذى اكتشف أول حالة انقطاع فى الحلقات.

القمر تَيْتَان

تم اكتشاف القمر الأكبر التابع لكوكب زحل (تيتان) عن طريق الفلكى الهولندى كريستيان هيجن فى عام ١٦٥٥، ويبلغ قطره خمسة آلاف ومائة وخمسين كيلومترًا، وهو ما يجعله ثانى أكبر أقمار المجموعة الشمسية بعد چانيميد، وما يضعه حتى فى مقارنة مع عطارد وبلوتو. ودورة تيتان حول زحل ودورته حول محوره تتمان فى مدة متطابقة مقدارها خمسة عشر يومًا وثلاث وعشرون ساعة أرضية. ويواجه تيتان بالتالى زحل بجانب واحد على غرار قمرنا الأرضى.

وتم الحصول على الصور الأولى المقربة لتيتان عن طريق المركبة (فواياجير ١) فى عام ١٩٨٠. وتكشف تلك الصور عن غلاف جوى برتقالى وموحد وغير قابل للدخول إليه بسبب الطبقات الستراتوسفيرية غير النافذة للضوء المرئى. وقد أظهر التحليل الطيفى أن ذلك الغلاف الجوى مكون بشكل أساسى من النتروجين مثل الأرض، مع نسب طفيفة من الميثان والأرجون. كما نجد أيضا نسبا طفيفة للغاية من مكونات أخرى، مثل الإيثان وسيانور الهيدروجين ومونوكسيد الكربون على هيئة غازات أو أيروسول (جزيئات متناهية الصِّغَر صلبة)، وتتشكل تلك المكونات على الأرجح بدءا من الميثان بالغلاف الجوى الأعلى، ويمكنها أن تصنع ضبابا كثيفا وأمطارًا. وتجدر الإشارة أيضا إلى أن درجة الحرارة على سطح تيتان تبلغ مائة وثمانى وسبعين درجة مئوية تحت الصفر ومقدار الضغط (١,٥) بار.

ومن الممكن دراسة سطح تيتان برصده من خلال الأطوال الموجية فى نطاق الأشعة تحت الحمراء القابلة للنفاذ فى غلافه الجوى. وبهذا المنهج، نجح المرقب الفضائى هابل فى الحصول على الصور الأولى فى عام ١٩٩٤

وكشف عن منطقة لامعة يبلغ حجمها أربعة آلاف كيلومتر ويطلق عليها (إكزانادو).

لكن الدراسة المعمقة لتيتان لم تبدأ بحق إلا مع مقدم المركبة كاسيني في عام ٢٠٠٤. وبتحليق عقب الآخر، بدأت المركبة في تكوين صورة متزايدة الدقة لسطح تيتان. وأكدت بهذا الشكل وجود منطقة أكثر لمعانا، بل كشفت أيضًا عن تكوينات حديثة وبوجه خاص أخاديد مجهولة المصدر.

وكانت الطريقة الأخرى في دراسة سطح تيتان هي النزول على سطحه، وهو ما قامت به، في الرابع عشر من يناير عام ٢٠٠٥، المركبة هيجن الخاصة بوكالة الفضاء الأوروبية، بعد رحلة طويلة استغرقت سبعة أعوام برفقة كاسيني. وكشفت هيجن لدى وصولها عن مشاهد طبيعية مدهشة، يشكلها الميثان الذي يلعب في تيتان دورًا مقابلاً للمياه على الأرض. وأوضحت صور المركبة وجود مناطق قاتمة منخفضة، ربما كانت بحيرات جافة، ومناطق هضاب أكثر وضوحا تقطعها قنوات ضيقة لتصريف المياه. ومن جانب آخر، كشف الفحص المباشر للتربة عن وجود مادة متماسكة كالرمال مغطاة بقشرة رقيقة أكثر صلابة.

أونسلادوس

أونسلادوس هو قمر صغير تابع لزحل، ويبلغ قطره خمسمائة وخمسة كيلومترات فقط. ويتحرك القمر في مدار قريب للغاية من زحل على بعد مائتين وثمانية وثلاثين ألف كيلومتر من مركز الكوكب. ويقع مداره داخل الحلقة (E)، وهي نطاق ضبابي ممتد طويلا إلى أبعد من الحلقات التي نراها بشكل معتاد في صور زحل. ويتسم سطح أونسلادوس بأنه شديد التألق، ويعكس تقريبا كل الأضواء التي تصله. وسطحه شديد التباين حيث يتضمن خمسة أنواع مختلفة من الأراضي، وبصفة خاصة مناطق خالية من فوهات الاصطدام، وهي علامة على أن الكوكب نشط جيولوجيًا. وقد قام باكتشاف أونسلادوس عالم الفلك

ويليام هرشل عام ١٧٨٩. وتأتى شهرة هذا القمر من واقع أنه من الأجرام النادرة بالمجموعة الشمسية التى نتوقع العثور بها على ماء سائل، وربما بالتالى وجود شكل من أشكال الحياة.

وإبان التحليق فوق القمر فى عام ٢٠٠٥، رصدت المركبة كاسينى حول القطب الجنوبى منطقة تموج بالتصدعات التكتونية، وتنفث دفقات من بخار الماء وجزيئات الثلج. وتظهر فى قلب تلك المنطقة بشكل خاص (أخاديد النمر)، وهى أربعة شقوق بطول نحو مائة وثلاثين كيلومترًا، وعرض كيلومترين، وعمق خمسمائة متر، تبعد بعضها عن البعض وتتباعد بنحو خمسةٍ وثلاثين كيلومترًا. وكشفت المركبة أن تلك الأخاديد كانت المصدر الرئيس للانبعاثات. وأكدت أيضا أن حرارة التربة أكثر ارتفاعا فى تلك التشققات . مائة وخمس وثلاثون درجة مئوية - مقارنة بمتوسط درجة الحرارة السائدة وهى مائتا درجة تحت الصفر، وهى دلالة على وجود براكين جليدية (أى براكين تطلق الجليد بدلا من الصُّهارة).

ويمكن تفسير تلك الظاهرة بالتفكر فى قوى المد الناتجة فى وقت تخلخلات مدار القمر. فمن شأن قوى المد أن تتسبب فى حدوث استطالات وبالتالى احتكاكات فى الطبقات الخارجية من الثلوج. وينتج ذلك الاحتكاك كمية كبيرة من الحرارة فى قلب القمر أونسلادوس، بقدر يكفى لتحويل الجليد لمياه سائلة. ومن هنا، يأتى استنباط أن تحت السطح المجمد يوجد محيط من المياه السائلة هو مصدر البراكين الجليدية وقذف المادة نحو الحلقة (E) لزحل.

وفى عام ٢٠٠٩، اخترقت المركبة كاسينى الحلقة (E) ودرست تكوينها بفضل آليات تحليل الغبار الكونى. وبما أن تلك الحلقة مكونة بالأساس من المادة التى يقذفها أونسلادوس، فإننا هنا بصدد وسيلة لتحليل غير مباشر لتكوين القمر. وكانت النتيجة الأكثر أهمية هى اكتشاف أملاح الصوديوم فى حبيبات الجليد. ورغم وجود تفسيرات أخرى لهذه الظاهرة، فإن التفسير الأرجح هو أن أملاح الصوديوم هذه ناجمة عن تحلل الصخور المتصلة بالمياه السائلة تحت طبقة الجليد، وهو ما يؤكد احتمال وجود محيط من المياه السائلة.

وتبدو تركيزات أملاح الصوديوم ضعيفة؛ اثنان بالمائة فقط من كتلتها الكلية. وهى نسبة ضعيفة بحيث أن عمليات الرصد من الأرض لم تنجح قط فى اكتشافها. إن تلك النسبة الضعيفة للغاية لا تتوافق مع التفسير الذى ينسب تدفقات البخار والجليد إلى انبعاث مباشر من محيط قائم تحت ضغط. وبالتالى فإن التفسير الحالى يدخل فى الحسبان احتمال وجود مغارات تحت سطح القمر. فالمحيط السائل المتصل بالنواة الصخرية قد يكون يؤدى لصعود المياه المشحونة بالأملاح نحو تلك المغارات عبر شقوق فى وشاح القمر أونسلادوس. وفى تلك المغارات، فإن نسبة من المياه تتبخر وأخرى تتجمد لتشكل حبات الثلج. ويصعد البخار والثلج ثانية ببطء نحو السطح عبر شقوق أخرى ليتم قذفها فى النهاية للفضاء على شكل دفقات. إن ذلك السيناريو أقل حدة من التفسير السابق وقد يتضمن تفسيرًا لضعف تركيز الأملاح نسبيا.

وماذا عن احتمالات وجوذ أشكال للحياة؟ بالتأكيد، ليس ثمة أى دليل ملموس على ذلك حتى الآن. لكن مع ذلك فإن الركائز الثلاث الأساسية لقيام الحياة، وفقا لما نعرفه، قد اجتمعت. لقد أوضحت المركبة كاسينى أن القمر أونسلادوس يحتوى على المياه، وربما على هيئة سائلة، وعلى مصدر للطاقة، وعلى قوى المد والجزر، وعلى جزيئات يمكن أن تشكّل أساسًا لتكوُّن أحماض أمينية. يمكننا إذن أن نطلق العنان لخيالاتنا. وفى كل الحالات، فإن القمر أونسلادوس، من الآن فصاعدا، صار هدفا مفضلا فى البحث عن حياة خارج الأرض.

الأقمار التابعة لزُحَل

إن كوكب زحل محاط بما لا يقل عن أربعة وثلاثين قمرا؛ أهمها القمر تيتان الذى يبلغ قطره خمسة آلاف ومائة وخمسين كيلومترًا. كما يوجد ستة توابع بقطر يتراوح بين أربعمائة وألف وخمسمائة كيلومتر، وهى ميماس وأونسلادوس وتيتيس وديونيه ورياه وجابيه، بالترتيب التصاعدى للبعد عن الكوكب. كما أن لزحل توابع أخرى أصغر، تتألف بوجه عام من كويكبات تم

اقتناصها، أو بقايا صدمات أو ارتطامات. ويتسم القمران ميماس وتيتيس بأنهما مليئان بالفوهات. وبوجه خاص، يمكننا أن نرصد على سطح ميماس فوهة اصطدام ضخمة يصل قطرها لثلث قطر القمر.

أما القمر أونسلادوس فهو يبدو بالعكس مكسوًا بمناطق كبيرة من الجليد شديد النقاء ويخلو فى الواقع من الفوهات، وهو ما ينم عن تعرضه لنشاط جيولوجى حديث ربما منذ أقل من مائة مليون سنة. ويرجع ذلك النشاط على الأرجح لقوى مد وجزر ناتجة عن التفاعلات الجذبوية بين أونسلادوس وديونيه وزحل، وهى الحالة الشبيهة بحالة القمر إيو حول المشترى.

وإذا انتقلنا إلى الأقمار الثلاثة ديونيه ورياه وجابيه فسنجد أنها تشترك ثلاثتها فى سمة واحدة، وهى الاختلاف الشديد فى معالم نصفَى كرة الكوكب فى كل منها. فالقمران ديونيه ورياه يتسم كلاهما بنصف كرة زاخر بالفوهات، ونصف آخر أكثر نعومة مغطى بمساحات لامعة ذات أصل لا زال مجهولا. ويتجلى التباين بشدة فى حالة القمر جابيه الذى يمتلك نصف كرة شديد القتامة ونصفا شديد اللمعان. وفى هذه الحالة الأخيرة، يعتقد علماء الكواكب أن النصف القاتم راجع لقربه من تابع آخر هو فوبيه. ذلك الكويكب القديم، الذى اقتنصه زحل، يتكون من مواد قاتمة للغاية تفر شيئا فشيئا نحو الخارج وتغطى بشكل خاص أحد نصفَىْ كرة جابيه.

كوكب أورانوس

يوجد الكوكب أورانوس على بعد تسع عشرة وحدة فلكية من الشمس، أى نحو (٢,٨٧) مليار كيلومتر. وبسبب تلك المسافة، فهو يحتاج لأربعة وثمانين عاما أرضيا ليكمل دورة واحدة حول الشمس. وهو ثالث الكواكب العملاقة بالمجموعة الشمسية بقطر يناهز واحدًا وخمسين ألفًا وثمانمائة كيلومتر. ويتكون كوكب أورانوس فى المقام الأول من الهيدروجين والهليوم مع نسبة قليلة من الميثان ونسب طفيفة للغاية لمكونات أخرى. وقد بدا الكوكب كليا، إبان تحليق المركبة (فواياجير ٢) حوله، فى عام ١٩٨٦، ذا لون أزرق ضارب إلى

الخضرة، دون ظهور أى تفاصيل مرئية. وبسبب كتلته، فإن مخزون الطاقة الداخلية به يقل عنه مقارنة بالمشترى وزحل، ومن ثَم فإن الحمل الحرارى فى غلافه الجوى أقل كثيرا. ومن هنا، يأتى غياب الخطوط علَى سطحه والمظهر الأكثر تجانسا الذى يظهر به ذلك السطح. مع ذلك، فقد كشفت عمليات رصد أحدث بالمرقب الفضائى هابل عن تكوين من الشرائط يرجع على الأرجح لتغيرات مناخية تحدث على مر دورة الكوكب حول الشمس.

ويُعزى اللون الأزرق الضارب إلى الخضرة لأورانوس إلى وجود الميثان فى الغلاف الجوى العلوى به، وذلك على النحو التالي: تنعكس أشعة الشمس على السحب الأكثر ارتفاعا بالكوكب، لكنها قبل ذلك لا بد أن تخترق طبقات الميثان الموجودة أعلاه. ومن شأن الميثان أن يمتص بشكل خاص الشطر الأحمر من طيف الأشعة الشمسية، بالتالى فإن الشق الأزرق هو فقط الذى سيفلت ويصطبغ به مظهر الكوكب.

وتتسم دورة الكوكب حول محوره بأنها سريعة نسبيا، حيث تستغرق فترة تربو قليلا على سبع عشرة ساعة. ويتميز أورانوس عن باقى الأجسام بالمجموعة الشمسية بحقيقة أن محور دورانه حول نفسه شبه أفقى، أى أنه يقع تقريبا فى مستوى المدار. وبهذا الشكل، فإبان تحليق المركبة (فواياجير ٢) فى عام ١٩٨٦، كان القطب الجنوبى للكوكب فى مواجهة الشمس. وفى عام ٢٠٠٧، أى بعد مرور ربع فترة الدوران حول الشمس، كان خط استواء الكوكب هو المنطقة الأكثر إضاءة. وقد تكون تلك التقلبات هى مصدر للتغيرات المناخية البطيئة التى تم رصدها على الكوكب. وجدير بالذكر أيضا أن الوضع غير المعتاد لمحور دورانه حول نفسه قد يكون على الأرجح نتيجة الاصطدام بكوكب أوَّلى آخر فى ماضٍ بعيد.

الأقمار والحلقات

ويمتلك أورانوس على الأقل سبعة وعشرين تابعا، الخمسة الرئيسة منها هى بالترتيب التصاعدى للمسافة من الكوكب: ميراندا وأرييل وأمبرييل وتيتانيا

وأوبرون. وأكبر تلك التوابع هو القمر تيتانيا بقطر يبلغ ألفًا وخمسمائة وثمانين كيلومترًا، أى أقل من نصف قطر قمرنا.

والكوكب محاط كذلك بالعديد من الحلقات الرفيعة للغاية، وقد تم اكتشافها من الأرض إبان رصد احتجاب أحد النجوم فى عام ١٩٧٧. وتم التأكيد على وجودها إبان تحليق المركبة (فواياجير ٢)، كما تم الكشف عن حلقات أخرى بعد ذلك، لاسيما عن طريق المرقب الفضائى هابل. وتتكون تلك الحلقات من كرات من الثلج القاتم وذى قدرة الانعكاس الضئيلة، وأكبرها يمكن أن يصل قطره إلى عدة أمتار.

الاكتشاف

وقد تم رصد أورانوس عدة مرات فى القرنين السابع عشر والثامن عشر. لكن عمليات الرصد الأوَّلية عَدَّته أحد النجوم. وفى عام ١٧٨١، نجح الفلكى الإنجليزى وليام هرتشل للمرة الأولى فى اكتشاف حقيقة كونه كوكبا، وهو أول الكواكب التى لم تميزها الحضارات القديمة. وتم اقتراح العديد من الأسماء له وبوجه خاص جورجيوم سيدوس تشريفًا للملك جورج الثالث أو هرتشل تكريما لمكتشفه. لكن كان الألمانى چون إليرت بود، الذى وضع قانون تيتوس بود، هو الذى اقترح أخيرا الاسم المتداول (أورانوس) والمستوحى من اسم إله السماء لدى الإغريق.

ثم اكتشف، فى عام ١٧٨٧، ويليام هرتشل القمرين الأكبر حجمًا، تيتانيا وأوبرون. أما القمران أمبرييل وأرييل فكان الإنجليزى ويليام ليسيل قد اكتشفهما فى عام ١٨٥١، والقمر ميراندا اكتشفه الأمريكى چيرارد كويبر فى عام ١٩٤٨. وأسماء الأقمار هذه مستمدة من أسماء شخصيات من مسرحيات وليام شكسبير.

الكوكب نبتون

أما الكوكب نبتون، فإن مداره يقع على بعد (٤,٤٩٥) مليار كيلومتر أى نحو ثلاثين وحدة فلكية من الشمس، وهو ما يجعله فى الحقيقة أبعد الكواكب

الكلاسيكية بالمجموعة الشمسية (بعد أن خرج كوكب بلوتو من المنافسة إثر تحوله إلى كوكب متقزم أبيض). وبسبب تلك المسافة، فإن نبتون يدور حول الشمس فى فترة طويلة للغاية تبلغ مائة وخمسة وستين عاما أرضيا.

ويبلغ قطر الكوكب نبتون نحو تسعة وأربعين ألفا وخمسمائة كيلومتر، وهو ما يقل بشكل طفيف عن قطر أورانوس، لكنه يعادل مع ذلك أربعة أمثال قطر الأرض. وفى المقابل يتسم نبتون بكتلة أكبر من كتلة أورانوس، وتبلغ نحو سبعة عشر مثل كتلة الأرض. ويتكون الكوكب بشكل أساسى من الهيدروجين والهليوم. ويمتلك نواة هائلة من الصخور السائلة والمياه والأمونيا والميثان، وهى تمثل ثلثى القطر. ويتكون الثلث الخارجى من الهيدروجين والهليوم والمياه والميثان.

ويتكون السطح الخارجى لنبتون من طبقات سحابية سميكة، ويبدو أزرق اللون بسبب وجود الميثان. وتتحرك تلك السحب بسرعات قد تصل لألفى كيلومتر فى الساعة، وهى سرعات قياسية بالنسبة للمجموعة الشمسية. ويمكننا أن نجد سحبا طويلة بيضاء تكسر رتابة المشهد، وتتكون من بلورات ثلج الميثان، كما نجد أيضا بقعا زرقاء كبيرة تعود إلى أعاصير شبيهة بأعاصير المشترى.

الأقمار والحلقات

ويمتلك نبتون على الأقل ثلاثة عشر قمرا تابعا، فى مقدمتها القمر ترايتون، وهو القمر الوحيد الكبير بدرجة كافية ليتشكل على هيئة كُرِّية. ويبلغ قطره ألفين وسبعمائة كيلومتر ومحاط بغلاف جوى خفيف غنى بالنتروجين مع وجود نسبة طفيفة من الميثان. وقد رصدت المركبة (فواياجير ٢) فى عام ١٩٨٩ به أقل درجة حرارة بالمجموعة الشمسية، وهى مائتان وست وثلاثون درجة مئوية تحت الصفر، وسطحه المغطى بجليد النتروجين معقد للغاية، مع وجود بعض التكوينات التى تشبه النبوع والتى يمكنها أن تقذف بالنتروجين حتى ارتفاع ثمانية كيلومترات.

ويتحرك ترايتون فى مدار تراجعى أى فى اتجاه معاكس لدوران نبتون حول محوره وهو أمر غير معتاد بالمرة. ويتمثل التفسير الأرجح لذلك فى أن ترايتون لم يتشكل فى نفس موقع تكوُّن نبتون، لكن تم اقتناصه على الأرجح بالشد الجذبوى للكوكب فى ماضٍ بعيد. وتظهر عمليات الرصد كذلك أن الأقمار تقترب بشكل جبرى من نبتون تحت تأثير قوى المد. ومن المتوقع أن ينفجر القمر يوما ما ويولِّد حلقة بديعة حول الكوكب.

جدير بالذكر أيضا أن نبتون محاط بسلسلة من الحلقات الرقيقة المكونة على الأرجح من الغبار. وتتسم تلك الحلقات بأنها غير منتظمة، وبها أجزاء أكثر كثافة من سائر الحلقة؛ الأمر الذى يضفى عليها شكل القوس. وقد تم رصد أولى الحلقات من الأرض إبان احتجاب نجمى فى الثمانينيات، وتم اكتشاف حلقات أخرى فى عام ١٩٨٩ عن طريق المركبة (فواياجير ٢).

إكتشاف

وكان نبتون الجرم السماوى الأول الذى يتم اكتشافه عبر الحسابات الفلكية وليس وليد صُدف الرصد، وكانت دراسات مطولة لحركة أورانوس قد أظهرت أن أورانوس يتعرض لخلخلة جذبوية يسببها جرم مجهول. وقد استخدم الفلكى الفرنسى أوربان لو فرييه والإنجليزى چون كوش أدامز بشكل مستقل قوانين الميكانيكا السماوية لتحديد موقع هذا الجرم. وبدأ الفلكى الألمانى جوهان جوتفريد عمليات الرصد للموضع الذى حدده لو فرييه، ونجح بالفعل فى رصد الكوكب نبتون، فى المكان المتوقع فى الثالث والعشرين من سبتمبر عام ١٨٤٦. ومن ثَم لم يكن ذلك مجرد اكتشاف لكوكب جديد لكنه شكَّل انتصارا لميكانيكا السماء.

بلوتو والكواكب المُتقزِّمة الخارجية

بلوتو وشارون

لقد عُدَّ الكوكب بلوتو لوقت طويل آخر كواكب المجموعة الشمسية، لكنه تراجع فى عام ٢٠٠٦ لمصافِّ الكواكب المتقزمة، وكان كليد تومبو قد اكتشفه

فى عام ١٩٣٠. ومدار بلوتو ليس متراكزا حول الشمس وبالتالى ثمة تباين كبير فى بعد نقاط مداره حول النجم؛ حيث تتراوح هذه المسافة بين ثلاثين وتسع وأربعين وحدة فلكية. ومن هذا المنطلق فإنه خلال بعض الفترات يكون أقرب للشمس من نبتون، وهو ما حدث بين عامَى ١٩٧٩ و١٩٩٩. ويتسم مداره كذلك بميل شديد بالنسبة لمستوى البروج يصل إلى سبع عشرة درجة.

وبسبب بعده، فإن دراسة بلوتو صعبة للغاية، حيث لم يتم التحليق عليه أبدا بالمركبات الفضائية. ولذلك ظل الغموض يحيط به حتى عام ١٩٧٨ حين اكتُشف أن له قمرا تابعا كبيرا هو شارون، يقع على مسافة تسعة عشر ألفا وستمائة كيلومتر. وإحدى الخصائص الملحوظة لهذا الزوج من الأجرام تكمن فى واقع أن زمن دورة الكوكبين حول نفسهما متطابقة، بل ويساوى كذلك مدة دوران كل منهما حول الآخر (نحو ستة أيام أرضية). إننا هنا بصدد ظاهرة استثنائية تماما. فالجرمان يتواجهان دوما بالوجه ذاته ومن ثَم يبدو كل منهما ثابتًا فى سماء الآخر. وظل الأمر على هذا المنوال حتى عام ٢٠٠٥، حيث تم اكتشاف قمرين صغيرين آخرين تابعين لبلوتو؛ هما ميكس وهيدرا عن طريق المرقب الفضائى هابل.

وبفضل ظاهرة شديدة الندرة، وهى مرور الأرض فى مستوى مدار تلك المنظومة بين عامى ١٩٨٥ و١٩٩٠، نجح الفلكيون فى رصد سلسلة من ظواهر الكسوف المتبادلة بين الجرمين الرئيسين، مكّنتهم من استنباط أبعاد الجرمين، حيث قدروا قطر بلوتو بألفين وثلاثمائة كيلومتر وقطر شارون بألف ومائتى كيلومتر. ولعلنا نلحظ أن المسافة التى تفصل بين الجرمين لا تزيد، بهذا الشكل، على ثمانية أمثال قطر بلوتو.

وقد كشفت عمليات الرصد الطيفى أن سطح بلوتو مغطى بالجليد ويتكون فى المقام الأول من النتروجين مع قليل من الميثان، مع غلاف جوى خفيف للغاية يسوده ضغط جوى أضعف مائة ألف مرة من الضغط الجوى الأرضى. ودرجة الحرارة فى المتوسط تبلغ مائتين وعشرين درجة مئوية تحت الصفر.

إريس

وثمة كوكب متقزم آخر بعد نبتون هو إريس، وتم اكتشافه عام ٢٠٠٥ فى صور ملتقطة فى عام ٢٠٠٣ من مرصد جبل بالومار. وتفيد قياسات المرقب الفضائى هابل، أن قطر إريس يناهز ألفين وأربعمائة كيلومتر، وهو ما يزيد قليلا على قطر بلوتو. ويدور الكوكب الضئيل فى مدار شديد البيضوية، وبعده عن الشمس يتراوح بين ثمانٍ وثلاثين وثمانٍ وتسعين وحدة فلكية (أى ما بين (٥,٦) و(١٤,٦) مليار كيلومتر). وكشفت كذلك عمليات رصد أخرى بالمرقب (كيك) عن وجود قمر آخر هو (ديزنوميا)، ويدور حول إريس على مسافة نحو ستة وثلاثين ألف كيلومتر.

هيوما وماكماك

وفى نهاية المطاف، فى عام ٢٠٠٨، تم تعريف كوكبين آخرين هما هيوما وماكماك بكونهما متقزمين. وكان قد تم اكتشاف هيوما فى عام ٢٠٠٥ من مرصد (سييرا نيڤادا)، وتتراوح مسافته عن الشمس بين خمسٍ وثلاثين وإحدى وخمسين وحدة فلكية، وله تابعان هما (هاى إياكا) و(ناماكا). ويدور الكوكب المتقزم بسرعة كبيرة للغاية حول نفسه فى أربع ساعات، وشكله بالتالى بيضوىّ أكثر منه كُرِّى، بقطر أعظم يبلغ ألفَىْ كيلومتر وقطر أدنى يبلغ ألف كيلومتر. وتم الكشف عن ماكماك بواسطة مرقب آلى بمرصد جبل بالومار عام ٢٠٠٥، ويتراوح بعده عن الشمس بين تسع وثلاثين وثلاث وخمسين وحدة فلكية، وليس له تابع معروف، ويبلغ قطره نحو ألف وستمائة كيلومتر. وهيوما مستمد من اسم إلهة الخصوبة والميلاد فى ميثولوجيا هاواى. أما ماكماك فهو منسوب لاسم خالق الإنسانية ورب الخصوبة فى ميثولوجيا جزر الفصح.

المُذنَّبات

كانت الخطوات الأولى فى دراسة المذنبات هى تلك التى اتخذها الفلكى الإنجليزى إدموند هالى. بدأ الأمر بملاحظته نوعا من التشابه بين حالات ظهور المذنبات فى أعوام ١٥٣١ و١٦٠٧ و١٦٨٢، ومن هذا المنطلق طرح

فكرة أن الحالات الثلاث هى لجرم سماوى واحد، مستندا فى ذلك إلى القوانين التى كان قد وضعها حديثا إسحق نيوتن لحساب مدار ذلك الجرم، ومن ثَم تكهن بعودته فى عام ١٧٥٨، وهو ما حدث بالفعل. وهكذا كشف مذنب هالى عن طبيعته الحقيقية: جرم يتحرك فى مدار مسطح للغاية، ويمضى معظم وقته عند تخوم المجموعة الشمسية، لكن يأتى بشكل دورى ليزور الشمس، ولا يمكن رؤيته إلا فى ذلك الوقت.

والمذنبات هى أجرام صغيرَة لا يزيد قطرها على عدة كيلومترات ويتكون ثلاثة أرباعها من الجليد، وبالتحديد من الجليد المائى والباقى من الغبار الغنى بالكربون. وبفعل مداراتها، فإن تلك الأجرام تمضى الجانب الأكبر من وقتها فى مناطق بعيدة عن الشمس بعد نبتون وبلوتو، وهى بالتالى شديدة البرودة وعلى هيئة صلبة.

فى وقت المرور الدورى بالقرب من الشمس تحدث الظواهر التى تجعل المذنبات تتألق. ففى الواقع، على بعد عدة وحدات فلكية من الشمس، وتحت تأثير الأشعة الشمسية، تسخن الثلوج الموجودة على سطح نواة المذنب وتتبخر ساحبة معها جزيئات الغبار. ويظهر حينذاك حول النواة غلاف منتشر من الغاز والغبار، هو ذيل المذنب، والذى قد يصل طوله إلى مائة ألف كيلومتر، والذى يستمر فى الكِبَر مع الاقتراب من الشمس. إن ذلك الغلاف يكون مضيئا بشدة بسبب إشعاع الغاز به؛ وأيضا بسبب انعكاس أشعة الشمس على الغبار.

وحين يقترب المذنب من الشمس، تحدث ظاهرة أخرى أكثر إبهارا. فالرياح الشمسية وضغط إشعاعها يجذبان ذلك الذيل ويمنحانه شكلا شديد الاستطالة وطولا مبهرا يمتد لملايين الكيلومترات، بل يمتد أحيانا لمدى وحدة فلكية كاملة. وهكذا يظهر هذا الذيل للمذنب والذى ربما يُعدُّ الظاهرة الفلكية الأكثر إبهارا من بين الظواهر القابلة للرصد بالعين المجردة. وحول ذلك الذيل، يوجد غلاف هائل غير مرئى من الهيدروجين الذى ينبع من التفاعلات الكيميائية بين الفوتونات الشمسية وجزيئات الماء المنبعثة من نواة المذنب.

وجدير بالذكر أنه، فى معظم الأحيان، يكون هناك فى الواقع ذيلان أحدهما مستقيم والآخر مُنْحنٍ. وهذان الذيلان يتكونان من عناصر مختلفة. الذيل الأول يتكون من الغبار المندفع بفعل ضغط إشعاع الفوتونات الشمسية. وتلك العملية تكون بطيئة نسبيا، واندفاع الذيل يتعرض بالتالى لتأثير حركة المذنب ويصبح منحنيا. أما الذيل الثانى، فيكون مكونا من أيونات تطيح بها الرياح الشمسية. وفى تلك الحالة، تكون العملية عنيفة وسريعة، لأن الأيونات تكون خفيفة للغاية، ويكون الذيل بالتالى مستقيما ومدببا فى الاتجاه المقابل للشمس.

والمذنب الأكثر شهرة هو بالتأكيد مذنب هالى، الذى يزورنا كل ستة وسبعين عاما، والذى رُصد من قديم الزمن فى عام ٢٤٠ قبل الميلاد. وكان مروره الأخير فى عام ١٩٨٦. وقد تم رصده فى تلك الفترة بخمس مركبات فضائية أرسلت لنا العديد من المعطيات حول نواته وجسمه وذيله. وكانت أقل مسافة اقتراب هى ستمائة كيلومتر من النواة، للمركبة الأوروبية (جيوتو)، التى نجحت فى التقاط صور للنواة كاشفة جسما قاتما للغاية على شكل ثمرة البطاطس بطول ستة عشر كيلومترا وعرض ثمانية كيلومترات. ونجحت المركبة أيضا فى الكشف عن مناطق انبعاث دفقات من الغبار على الجانب الذى تضيئه الشمس.

حزام كويبر وسحابة أورت

يعرف الفلكيون منذ وقت طويل أن ثمة نوعين مختلفين من المذنبات. أولاً تلك التى تتسم بدورة قصيرة تقل عن مائتَىْ عام مثل مذنب هالى. ومن خصائص مداراتها أنها تقع فى المستوى البروجى على غرار الكواكب.

ثم تأتى المذنبات طويلة الدورة والتى تزيد دورتها على مائتى سنة؛ وبوجه خاص تلك التى لم يتم رصدها سوى مرة واحدة والتى تقدر دورتها بعدة ملايين من السنوات. وتكون مداراتها عملاقة وموزعة عشوائيا فى السماء دون اتجاه

خاص. ذلك التقسيم لمجموعتين قاد الفلكيين إلى استنتاج وجود مخزنين منفصلين للمذنبات: حزام كويبر وسحابة أورت، على اسم الفلكيين جيرارد كويبر وچان أورت اللذين تخيلا وجودهما فى الخمسينيات.

وتأتى المذنبات قصيرة الدورة من حزام كويبر، المنطقة الموجودة فى مستوى المنظومة الشمسية بعد مدار نبتون. ذلك الحزام يبدأ على الأرجح عند نحو ثلاثين وحدة فلكية ويمتد حتى مئات الوحدات الفلكية، ويحتوى، طبقا لتقديرات العلماء، على مائتى مليون جرم صغير مجمد قابل لأن يصبح مذنبا. وبعض الفلكيين يعتقدون حتى أن ترايتون وبلوتو وشارون هى أجرام من ذلك الحزام لكن تتميز فقط بحجمها الاستثنائى ومداراتها. ويقال أن التقلبات الجذبوية التى تشهدها الكواكب العملاقة هى التى تتسبب من وقت لآخر فى تغيير مدار أحد تلك الأجرام وتدفعه ليهوى نحو الشمس.

وبالنسبة للمذنبات طويلة الدورة، فإن مصدرها هو سحابة أورت. وتمتد تلك السحابة لمسافات تتراوح بين ثلاثين ألفا ومائة ألف وحدة فلكية وتضم مئات المليارات من الأجرام. فى تلك المناطق البعيدة، تقع نويات المذنبات على مسافات تبلغ نسبة لا يُستهان بها من المسافة التى تفصلها عن أقرب النجوم. ومن الوارد إذن أن يكون من شأن هذه النجوم أن تتعرض لتقلبات جذبوية تدفع بإحدى نويات السحابة على الاندفاع إلى داخل المجموعة الشمسية. وسحابة أورت تتكون على الأرجح من أجرام تم لفظها فى الساعات الأولى لنشأة المنظومة الشمسية، بفعل ظواهر مثل الصدى بالنسبة للكواكب العملاقة. وفى المقابل، يعتقد العلماء أن أجرام حزام كويبر نشأت على الأرجح فى موضعها ذاته.

ومن بين الطفرات الحديثة فى دراسة المجموعة الشمسية اكتشاف أجرام صغيرة الحجم أبعد من مدار نبتون ولها مدارات دائرية، وهو ما يميزها عن المذنبات المعتادة. فى هذا السياق كشفت صور للسماء تلتقط منذ عام ١٩٩٢، بفترات تعريض كبيرة، عن أجرام موجودة على بعد مسافات تتجاوز الثلاثين وحدة فلكية، ومعظمها يبلغ قطره عدة مئات من الكيلومترات. وأكدت نتائج

عمليات الرصد هذه وجود حزام كويبر الذى لم يكن حتى ذلك الوقت سوى فرضية نظرية. وإذا كانت عمليات الرصد من سطح الأرض لا تتيح سوى رصد الأجرام شديدة الإضاءة وبالتالى كبيرة الكتلة؛ فإن المرقب الفضائى هابل هو الذى رصد عام ١٩٩٤ للمرة الأولى أجراما من حزام كويبر ضئيلة الحجم قد لا يزيد قطرها فى بعض الأحيان على عدة كيلومترات.

[٥]

الشمس والنجوم

الشمس

كان ينبغى الانتظار حتى القرن السابع عشر ليتبين الفلكيون، فى نهاية المطاف، أن الشمس ليست جرما خاصا فى الكون، لكن مجرد نجم مثل غيره. والأمر الوحيد الذى يميزها عن النجوم الأخرى هو قربها من كوكبنا. وبذلك تكون الشمس النجم الوحيد القريب من الأرض بدرجة تكفى لدراسته تفصيليا، والنجم الوحيد الذى يمكننا رصد سطحه والبيئة القريبة منه بدقة. وفضلاً عن أهمية هذه الدراسة فى حد ذاتها، فإنها تمثل كذلك خطوة رئيسة فى فهمنا العام للنجوم.

والشمس هى جرم بسيط نسبيا، يتجسد فى كرة عملاقة من الغاز يبلغ قطرها (١,٤) مليون كيلومتر؛ أى مائة وعشرة أمثال حجم الأرض. وتصل كتلتها إلى ألفَىْ مليار مليار مليار كيلوجرام، أى ثلاثمائة وثلاثين ألف مرة مثل كتلة الأرض. ويتكون نحو خمسة وسبعين بالمائة من تلك الكتلة من

الهيدروجين وخمسة وعشرين بالمائة من الهليوم ونسبة ضئيلة جدًا، (٠,١) بالمائة، من عناصر أثقل.

التركيبة الداخلية

وجوف الشمس يتسم بظروف تجعل من المحال رصده، ومن ثم، فإنه ينبغى اللجوء لتكوينات نظرية لوصف الظواهر التى تحدث به وتحديد تكوينه الداخلى. ولقد أوضحت تلك الدراسات أن جوف الشمس منقسم لثلاث مناطق؛ هى النواة والمنطقة المشعة ومنطقة الحمل الحرارى. والنواة هى الجزء الذى يولِّد حرارة الشمس بسبب التفاعلات النووية. والحرارة بها مرتفعة إلى أقصى حد، حيث تناهز خمسة عشر مليون درجة كلفين. وتلك المنطقة تمثل نحو خمسة وعشرين بالمائة من قطرها. ونظرا لكثافتها الكبيرة، فإنها تحتوى على ستين بالمائة من الكتلة الكلية لنجمنا.

وتحيط بالنواة المنطقة المشعة التى تمثل خمسة وخمسين فى المائة من نصف قطر الشمس. وفى تلك المنطقة، تنتقل الطاقة الناشئة فى النواة إلى الخارج بواسطة الفوتونات. ذلك النمط فى نقل الحرارة يكون بطيئا للغاية لأن الفوتونات يتم امتصاصها بشكل متواصل ثم يعاد إطلاقها عبر كل الجزيئات الموجودة. ولذلك يقدر الزمن الذى يستغرقه فوتون واحد ليفلت من الشمس بمئات الآلاف من السنين، فى حين أن ذلك الإفلات لا يستغرق سوى عدة ثوانٍ إذا لم يكن ثمة عقبات فى طريقه.

فى النهاية، فإننا نصل للطبقة الخارجية وهى منطقة الحمل الحرارى التى تمثل ثلاثين بالمائة من قطر الشمس، والتى تنخفض بها درجة الحرارة إلى أقل من مليون كلفين. فى تلك الطبقة، تنتقل الطاقة بالحمل الحرارى أى بحركة مجمل المادة الموجودة. والغاز الساخن المنبعث من الأعماق يصعد بهذا الشكل إلى السطح ويحرر الطاقة ويبرد ثم يعود ويغوص مرة أخرى نحو الداخل؛ وهلم جرًا.

السطح والبقع الشمسية والمغناطيسية

الطابع المحبب لسطح الشمس

ومع استمرار الابتعاد إلى الخارج، فإننا نصل بعد ذلك لما يمكن اعتباره سطح الشمس. على الرغم من أنه لا يمكن فى الواقع الحديث عن حدود واضحة. وتسمى هذه المنطقة الفوتوسفير ويبلغ سمكها مئات الكيلومترات. والحرارة لا تنخفض فيها إلا بشكل طفيف من ستة آلاف إلى أربعة آلاف كلفين، لكن الكثافة بها تقل بشكل سريع. لهذا السبب، فإن كل طبقات الغاز الموجودة بعدها تكون خفيفة للغاية وبالتالى مُنْفذة للضوء. بهذا الشكل، فإن الفوتوسفير هو آخر طبقة غير منفذة للضوء ولامعة وتجسد الشكل الذى نراه حين ننظر للشمس. فضلا عن ذلك، بما أن انخفاض الكثافة يكون سريعا للغاية، فإن حدود تلك المنطقة تكون واضحة المعالم وهو ما يفسر لماذا يمتلك قرص الشمس حدودًا واضحة وليس حدودًا مطموسة.

ولا يتسم سطح الشمس بالاستواء مطلقًا. فعمليات الرصد ذات النقاء المرتفع تظهر فى الواقع أن الفوتوسفير على هيئة حُبَيْبات. ففى كل لحظة هناك ملايين الحبيبات تظهر على القرص الشمسى بحجم متوسط يبلغ ألف كيلومتر. وتُظهر الصور المتعاقبة، فضلا عن ذلك، أن مظهر السطح يتغير بشكل سريع، لأن كل حُبَيْبة لا تعيش إلا لعدة دقائق.

وبفضل التحليل الطيفى، فقد كشف الفلكيون أن تلك الحبيبات مرتبطة بالحمل الحرارى فى الطبقات القريبة من السطح. فالغاز الساخن المنبعث من الأعماق يبلغ السطح ويتخلل الحبيبات، ثم يتمدد وتنخفض درجة حرارته قبل أن يعود ليغوص نحو الداخل على حواف الحبيبات. بهذا الشكل، فإن الغاز الموجود فى جوف الحبيبات تكون درجة حرارته أعلى بمقدار ثلاثمائة كلفين عن الغاز الموجود قرب الحواف. وذلك الاختلاف فى الحرارة، وبالتالى فى الإضاءة، هو الذى يضفى الطابع الحبيبى لقرص الشمس. وتجدر الإشارة إلى أنه فى الطبقات الأعمق تحدث تحركات أخرى للغاز على مستوى أكبر، وهذه

التحركات تولد خلايا ضخمة قد يصل قطرها لثلاثين ألف كيلومتر ولها فترة حياة تقدر بنحو يوم واحد.

البقع الشمسية

وثمة ظواهر أخرى تؤثر على شكل سطح الشمس لكن بصورة مؤقتة أطول. والبقع الشمسية هى المثال الأبرز، بما أن الفلكيين الصينيين كانوا يرصدونها بالفعل منذ أكثر من ألف عام. إنها مناطق صغيرة قاتمة موجودة على الفوتوسفير وقطرها يتراوح بين عدة آلاف وعدة مئات الالآف من الكيلومترات وتستمر بين عدة أيام وعدة شهور. وتبين عمليات الرصد فضلا عن ذلك مناطق لامعة تدعى عيون الشمس وهى تظهر قُبيل ظهور البقع وتستمر لعدة أسابيع بعد اختفاء تلك البقع. وقد أظهرت عمليات الرصد المستمر للشمس أن عدد البقع ليس ثابتا لكنه يتغير بشدة من فترة لأخرى. ويتراوح بين الصفر وقيمة قصوى فى دورة تستمر أحد عشر عاما، وآخر حد أقصى تم تأريخه حدث فى عام ٢٠٠٠ وكان الوقت المتوقع الذى يليه هو عام ٢٠١١.

إن البقع الشمسية هى مناطق من الفوتوسفير تكون حرارتها أقل بشكل طفيف من المتوسط، نحو أربعة آلاف كلفين بدلا من ستة آلاف. وهى بالتالى تبث قدرا أقل من الضوء مقارنة بجاراتها، وتبدو قاتمة بسبب تباين الضوء. وكشف التحليل الطيفى لها تمتعها بمجال مغناطيسى شديد. وذلك المجال المغناطيسى هو على الأرجح سبب اختلاف درجة الحرارة، رغم أن الآلية الدقيقة لكيفية حدوث ذلك ليست واضحة بعد. وقد طُرحت عدة فرضيات. تقول إحداها بشكل خاص، بأن من الوارد أن يكون المجال المغناطيسى يمنع تيارات الغاز الساخن الصاعدة من بلوغ السطح، لكن من الوارد كذلك أنه ثمة موجات مغناطيسية كثيفة تتولد على مستوى البقع، وهو ما قد يؤدى لفقْد للطاقة وبالتالى لحدوث تبريد.

الدورة الشمسية

وترتبط دورة الأحد عشر عامًا للبقع الشمسية بوجود مجال مغناطيسى مصحوب بظاهرتين أخريين: الدوران المتباين للشمس وحركة الحمل الحرارى قرب السطح. وعبارة الدوران المتباين للشمس تعنى أن نجمنا لا يدور حول نفسه ككتلة مثل الجسم الصلب، لكن بالعكس فإن كل منطقة عند خط عرض معين تدور بسرعة مختلفة عن الأخرى. على سبيل المثال، قرب القطبين تستغرق دورة كاملة خمسة وثلاثين يوما، فى حين أنها لا تمتد لأكثر من خمسة وعشرين يوما قرب خط استواء الشمس.

لكى نشرح كيف تحدث دورة الأحد عشر عاما فلنلجأ لمفهوم خطوط المجال. الأمر يتعلق بخطوط تخيلية توضح اتجاه المجال المغناطيسى فى كل النقاط وهى مفيدة للغاية كوسيلة لعرض المشهد. فى فترة السكون، حين لا يكون هنالك بقع مرئية، فإن خطوط المجال تصل ببساطة بين قطبَى الشمس مع اتباع محور الشمس بدرجة أو بأخرى.

وهنا يبدأ الدوران المتباين فى التأثير على الأمور. فبسببه، فى الواقع، تدور خطوط المجال بشكل أسرع قرب خط الاستواء عنها فى القطبين. ويجبرها ذلك على الالتفاف حول نفسها والاقتراب من بعضها البعض. وبعد عدد كبير من الدورات، تتخذ خطوط المجال فى نهاية المطاف أشكالا حلزونية ملتفة بشدة حول نفسها وشديدة التركز فى المناطق الاستوائية، وهو ما يولِّد مجالا مغناطيسيا شديد الكثافة.

فى الوقت ذاته، تؤثر تنقلات الحمل الحرارى قرب السطح هى الأخرى على خطوط المجال فتعمل على اعوجاجها وليِّها. ويكون من الممكن أن ينسلخ من وقت لآخر أحد خطوط المجال من منطقة الحمل الحرارى تحت تأثير التوائه الشديد ويشكل عقدة خارج الشمس. وعند طرفَىْ قاعدة تلك العقدة حيثما يخترق خط المجال طبقة الفوتوسفير تظهر حينذاك بقعتان شمسيتان واحدة عند كل طرف. وبهذا الشكل تولد شيئا فشيئا البقع الشمسية أزواجًا أزواجًا وتغطى الشمس بالبقع القاتمة.

فى نهاية المطاف، فى منتصف الدورة تؤدى زيادة العقد لتفاعل مشترك بين مختلف المناطق المغناطيسية، وهو التفاعل الذى يؤدى لتناقص عام فى الكثافة وإعادة توزع خطوط المجال بين مختلف البقع. وحين تنتهى تلك المرحلة من التداخل، تعاود خطوط المجال اتخاذ الشكل الحلزونى شديد الالتفاف لكن فى الاتجاه المعاكس لسابقه. وتكون المرحلة المتبقية لتأثير الدوران المتباين مقتصرة على فك التفاف خطوط المجال لكى تعود إلى مظهرها الأوَّلى، ولكى تعود الشمس لفترة هدوء دون بقع شمسية.

الكروموسفير والهالة والرياح الشمسية

الكروموسفير

فلنكمل رحلتنا إلى خارج الشمس. بمغادرة الفوتوسفير، فإننا ندخل فى طبقة خفيفة للغاية تدعى الكروموسفير. تلك الطبقة لها سمك يبلغ عدة آلاف من الكيلومترات وترتفع درجة الحرارة بها من أربعة آلاف إلى عشرة آلاف كلفين.

وبسبب كثافتها الضعيفة، وهى جزء من المليون من كثافة طبقة الفوتوسفير، تتسم تلك الطبقة بأنها شبه شفافة وبالتالى لا تكون مرئية فى صميم النهار. ومع ذلك يمكن رصدها إبان حالات الكسوف، وتبدو حينذاك مثل حلقة حمراء رقيقة للغاية تحيط بقرص القمر.

وثمة طريقة بسيطة نسبيًا لدراسة الكروموسفير دون انتظار حدوث الكسوف، وتتمثل فى رصد الشمس فى طول موجى خاص يتناسب مع نطاق من طيف الهيدروجين يدعى (إتش ألفا). فى هذا الطول الموجى، تمتص ذرات الهيدروجين فى الكروموسفير ضوء الفوتوسفير وتعيد بثها للخارج. وبالتالى، عند رصد الشمس تكون طبقة الفوتوسفير غير مرئية ولا يظهر سوى الكروموسفير.

لقد أظهر ذلك النوع من الرصد، بشكل خاص، أن الكروموسفير بعيد عن أن يكون متجانسًا؛ فحدوده الخارجية يخترقها العديد من البروزات العمودية تدعى (الشوك)، وتمتد فترة وجودها فى المتوسط لعشر دقائق. إنها انبعاثات غازية يبثها الكروموسفير بسرعة عشرين كيلومترًا فى الثانية وتخترق المنطقة الخارجية على مسافة عدة آلاف من الكيلومترات.

الهالة الشمسية

وبالاستمرار فى الابتعاد عن الشمس، فإننا نبلغ الحدود الخارجية للكروموسفير على بعد عدة آلاف من الكيلومترات من السطح. عند ذلك الحد، فإن درجة الحرارة تزداد فجأة بشكل مذهل لتبلغ سريعًا جدًا مئات الآلاف كلفين. لقد دخلنا فى الهالة الشمسية. تمتد تلك المنطقة لملايين الكيلومترات وتتسم بأنها متغيرة للغاية. إنها أيضًا أقل كثافة من سابقتها، حيث تكون بنسبة واحد إلى عشرة مليارات من كثافة الفوتوسفير. وتصل درجة حرارتها إلى حد أقصى يناهز عدة ملايين كلفين.

إن إحدى الظواهر الأكثر جمالاً على مستوى الهالة هى تكوُّن النتوءات، وهى أعمدة عملاقة من غاز أقل سخونة لكن أكثر كثافة من غاز الهالة وتتولد قرب السطح ويمكنها أن تمتد لمئات الآلاف من الكيلومترات، وبعضها التى توصف بالهادئة تأخذ شكل القوس ويمكن أن تبقى لعدة شهور. وأخرى تدعى الانفجارية تكون شبه عمودية وتتطور سريعًا فى عدة دقائق. وتظهر هذه النتوءات إما فيما وراء القرص الشمسى على شكل ألسنة لهب طويلة لامعة، وإما على القرص حيث تبدو قاتمة للغاية بالتباين الضوئى مع الخلفية اللامعة ونطلق عليها أيضًا اسم الخطوط الضوئية.

وتتعرض الهالة أحيانًا للاضطراب تحت وطأة ظواهر أكثر عنفًا تدعى الاندلاعات الشمسية. ففى عدة دقائق، تشهد مناطق صغيرة من الهالة الداخلية ارتفاعا حادا فى درجة حرارتها حتى خمسة ملايين كلفين وتبقى عند ذلك المستوى لما يقارب الساعة. وخلال تلك الفترة، يمكن لتلك المناطق المحددة أن تحرر نسبة لا يُستهان بها من الطاقة الإجمالية التى تطلقها الشمس. وفضلا

عن ذلك، تكون الاندلاعات فى أغلب الأحوال مصحوبة بقذف كتل من الهالة. مليارات الأطنان من المادة يتم قذفها بهذا الشكل نحو وسط ما بين الكواكب بسرعات تبلغ عدة مئات من الكيلومترات فى الثانية.

وقد تم الكشف عن تفاصيل أخرى حول العمليات التى تحدث فى الهالة عن طريق الرصد فى نطاق أشعة إكس. ففى الواقع، بما أن درجة حرارة الغاز بالهالة تبلغ عدة ملايين كلفين، فإن معظم الإشعاعات المنبعثة تكون فى هذا النطاق للطول الموجى. ولا شك أن مثل عمليات الرصد هذه لا يمكن أن تتم إلا من الفضاء. وبالتالى تم إطلاق عدة معدات فضائية لإجراء عمليات الرصد على أفضل صورة، لاسيما بواسطة المحطة الأمريكية (سكاى لاب) فى منتصف السبعينيات، والقمر الصناعى (إس إم إم) فى الثمانينيات والمركبة الأوروبية (سوهو) فى عام ١٩٩٥.

لقد أظهرت عمليات الرصد فى نطاق أشعة إكس أن توزيع الغاز فى الهالة غير متجانس بالمرة. وقد حددت تلك العمليات بشكل خاص نوعين خاصين من المناطق. أولاً المناطق النشطة، وهى مناطق شديدة اللمعان فى نطاق أشعة إكس تخضع لمجال مغناطيسى كثيف ومرتبطة على الأرجح بالبقع الشمسية فى طبقة الفوتوسفير. وثانيًا ثقوب الهالة، وهى مناطق قليلة الإضاءة فى نطاق أشعة إكس وتتسم كثافة وحرارة الغاز بها بأنها أضعف من المتوسط. وهذه الثقوب هى التى تمر من خلالها معظم الكتل المندفعة بشدة قبل مغادرة الشمس.

الرياح الشمسية

ولما كانت درجة الحرارة مرتفعة إلى أقصى حد فى الهالة، فإن سرعة تحرك الجزيئات تكون كبيرة بما يكفى لأن تنجح فى الإفلات من جاذبية الشمس. وحتى فى فترات الهدوء النسبى، فإن كمية كبيرة من الإلكترونات والبروتونات والجزيئات الأخرى المشحونة بالطاقة ـ نحو مليونَىْ طن من المادة فى الثانية ـ تفر من الشمس وتضيع فى وسط ما بين الكواكب. وبذلك كلما ابتعدنا عن الشمس، تناقص وجه تشابه الهالة بالغلاف الجوى وتتحول لدفقات

مستمرة من الجزيئات تدعى الرياح الشمسية. وبما أن كثافة الغاز والضغط تقلان مع الابتعاد عن الشمس، فإن الجزيئات تكسب شيئا فشيئا سرعات متزايدة حتى تتجاوز بشكل كبير سرعة الصوت. وعلى مستوى الأرض، فإن سرعتها تكون بمعدل نحو خمسمائة كيلومتر فى الثانية، وبكثافة عشرة جزيئات فى السنتيمتر المكعب.

حركة النجوم وبُعْدها

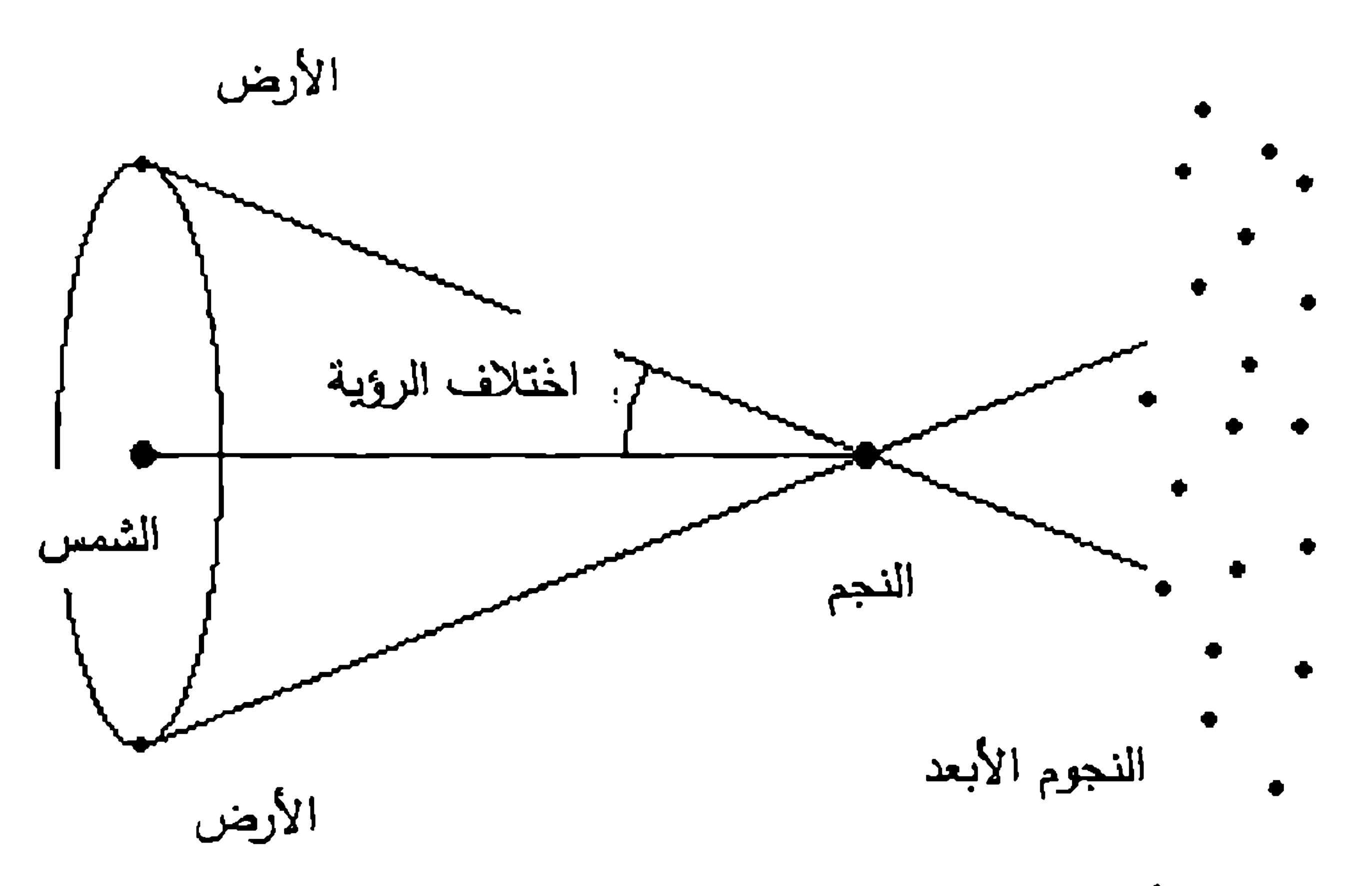
حتى منتصف القرن الثامن عشر، قلما كانت النجوم غير الشمس تمثل أهمية للفلكيين. ففى الواقع، بينما كانت الكواكب تنتقل فى السماء وكانت بعض تفاصيلها مرئية بالمرقب، كانت النجوم تبدو ثابتة تمامًا فى موقعها ولا يبدو عليها أى تغير حتى بالنسبة لأفضل المعدات. وكانت دراسة النجوم مقتصرة بالتالى على قياس الإحداثيات وتقديم كتالوجات. كان يبدو فى تلك الحقبة أن تلك الأجرام ستبقى دومًا بعيدة المنال وخارج مجال العلم.

وكانت الثورة الأولى فى عام ١٧١٨ حين أثبت إدموند هالى، مكتشف مُذنَّب هالى، أن النجوم ليست ثابتة فى السماء؛ فقد انكبَّ على رصد مواقع العديد من النجوم وقارن نتائجه بعمليات رصد أقدم بعد الأخذ فى الحسبان بتغير وضع الأرض. وتبين له أن بعض المواقع لم تكن مطابقة وهو ما لم يكن له من تفسير إلا أن النجوم المعنية تحركت مع الوقت. لقد فقد مبدأ ثبات السماء بهذا الشكل ما بقى له من دلائل. فالنجوم ليست ثابتة فى كرة هائلة لكن يمكنها التحرك بحرية بعضها بالنسبة لبعض. وبرصدها من الأرض، فإن ذلك يترجم بتغيرات طفيفة فى مواقعها فى السماء بمعدل ثانية قوسية فى العام بالنسبة للنجوم الأكثر قربًا.

وكانت المرحلة التالية فى دراسة النجوم تتمثل فى تحديد المسافة التى تفصلها عن الأرض. هل هى موجودة على سبيل المثال عند حدود المجموعة الشمسية، أم ألف مرة أبعد أو ربما مليون مرة أبعد؟ إنها مسألة أساسية بما أنها تتعلق بشكل أشمل بحجم الكون؛ هل ذلك الكون مقتصر على المجموعة الشمسية أم يمتد لأبعد من ذلك؟

طريقة قياس اختلاف الرؤية

كانت الطريقة الأولى التى ابتدعها علماء الفلك لقياس مدى بُعْد النجوم ترتكز على قياسات دقيقة لمواقع النجوم ولظاهرة اختلاف الرؤية؛ ولفهم هذه الظاهرة يمكنك القيام بتجربة شديدة البساطة: قف على بعد عدة أمتار من أحد الجدران ومد ذراعك اليمنى وارفع إحدى أصابعك ولاحظ موضعها بالنسبة للجدار. حرك رأسك الآن بالتبادل لليمين واليسار دون تحريك ذراعك. لو الأمور سارت بشكل جيد، فإن الموضع الظاهرى لإصبعك بالنسبة للجدار لا بد أن يتغير. هذه هى الظاهرة المعنية، التغير فى رؤية الموقع الظاهرى لجرم بعيد، نتيجة لتغير موضع الراصد، وهى ما نسميه اختلاف الرؤية.



بفعل دوران الأرض حول الشمس يتغير بشكل طفيف الوضع الظاهرى لنجم ما قريب بالنسبة للنجوم الأبعد. وبقياس التغير الزّاوىّ يمكننا تحديد مسافة ذلك النجم.

لقد حاول الفلكيون مبكرًا للغاية استخدام اختلاف الرؤية لقياس مسافة النجوم. فى الواقع، إذا استبدلت بإصبعك نجما قريبا واستبدلنا بالجدار خلفية من نجوم أخرى شديدة الابتعاد، فإن نفس الظاهرة ستحدث. وبسبب دوران الأرض حول الشمس، فإن الراصد من الأرض يكون فى حالة حركة. من هذا

المنطلق، فإن الموقع الظاهرى لنجم قريب بالنسبة لخلفية مكونة من النجوم الأبعد يتغير باستمرار بشكل طفيف. ولو كان التغير الزاوى الطفيف قابلاً للقياس، فإنه يمكننا بالاستعانة ببعض المعرفة الهندسية حساب المسافة بيننا وبين ذلك النجم.

الصعوبة الكبرى فى تلك التقنية تكمن فى واقع الأمر فى أن النجوم، حتى الأقرب منها للأرض، شديدة الابتعاد، وبالتالى فإن اختلاف الرؤية الخاص بها، أى الزاوية التى تحددها حركتها الظاهرية، يكون ضعيفًا للغاية. وظلت المحاولات مستمرة بلا جدوى إلى أن حل عام ١٨٣٧ حيث تحقق أول قياس، حين نجح الفلكى الألمانى ويلهلم بيسيل فى قياس اختلاف الرؤية للنجم (٦١ الدجاجة) وتحديد زاوية الاختلاف بمقدار ثلث ثانية قوسية. وبمعرفة مقدار نصف قطر مدار الأرض، وهو مائة وخمسون مليون كيلومتر، فقد كان بمقدوره حساب بُعْد النجم وهو مائة ألف مليار كيلومتر، أى ستمائة وثمانون ألف وحدة فلكية، أو إحدى عشرة سنة ضوئية. وبهذا المقدار أدرك الفلكيون، أخيرًا، مدى اتساع الفضاء بين النجمى ومدى ضآلة حجم المجموعة الشمسية بالنسبة للكون.

مقياس المسافات

ولتحقيق تصور أفضل لهذه المسافات الكونية فلنتخيل نموذجا مصغرا لجوار الشمس، باستخدام مقياس للمسافات فلنَقُل إن عشرة أمتار تمثل وحدة فلكية. الشمس والأرض إذن ستمثلان بكُرَتين قطرهما على التوالى (٩٠) و(٠,٨) ملليمتر ومنفصلتين بمسافة عشرة أمتار. وإذا أضفنا جسمين آخرين من المجموعة الشمسية فى موقعيهما، سيكون المشترِى على بعد اثنين وخمسين مترا من الشمس، وبلوتو على بعد أربعمائة متر.

والآن فلنحدد موضع النجوم القريبة. النجم (٦١ الدجاجة) ينبغى أن يكون موجودًا فى هذا النموذج على بعد ستة آلاف وسبعمائة كيلومتر من الشمس. أى لو أن النموذج موجود فى باريس، فسيكون موقع (٦١ الدجاجة) فى

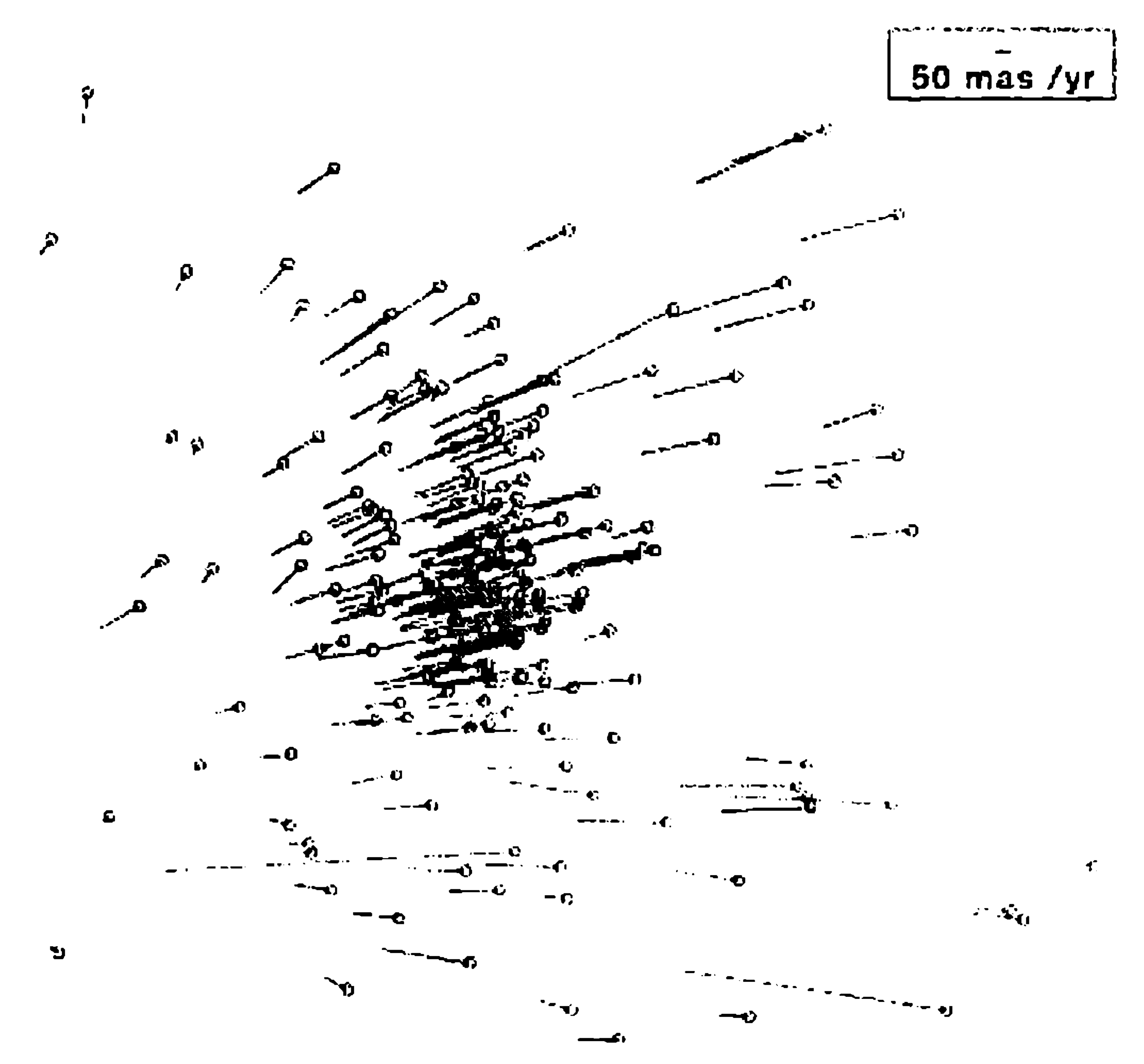
شيكاغو. أما النجم الأقرب من الشمس وهو (بروكسيما قنطورس)، فسوف يقع على بعد ألفين وسبعمائة كيلومتر من باريس؛ أى عند موسكو. بهذا الشكل، فإنه حتى النجوم الأقرب موجودة على مسافات خيالية تزيد بآلاف المرات على مسافة بلوتو، وهى مسافة فى حد ذاتها هائلة مقارنة بالمقاييس العادية.

وتجدر الإشارة أيضًا إلى أن أقصى مسافة قطعها الإنسان فى الفضاء، وهى المسافة من الأرض إلى القمر، لا تمثل فى نموذجنا سوى نحو ستة وعشرين ملليمترًا. لكن فلنعُد الآن لحساب المسافات باستخدام طريقة اختلاف الرؤية. إن العامل الأساسى الذى يحد هذا المنهج هو وجود الغلاف الجوى الأرضى. فى الواقع، وعلى نحو ما أسلفنا، فإن الاضطرابات الجوية تؤدى إلى تشويه صور السماء وتضع حدودا لدقة القياسات أيا كان حجم وجودة أدوات الرصد المستخدمة. تلك الحدود تكون بمقدار كسور من الثانية القوسية. وبسببها، فإن قياسات المسافات بطريقة اختلاف الرؤية لا تقدم نتائج جيدة إلا لمسافات لا تزيد على مائة سنة ضوئية، وهو ما يقلل بشكل كبير عدد النجوم القابلة للرصد.

والحل الحديث لعلاج تلك المشكلة هو وضع أداة الرصد خارج الغلاف الجوى الأرضى، وهو ما تم تنفيذه فى عام ١٩٨٩ بإطلاق قمر صناعى للقياس الفلكى يدعى (هيباركوس). وبتخلُّصه من مشكلات الاضطرابات الجوية، فقد كان ذلك القمر قادرًا على تحديد وضع النجوم حتى عدة أجزاء من الألف من الثانية القوسية؛ الأمر الذى أتاح رصد حالات اختلاف الرؤية حتى مسافة ألف وخمسمائة سنة ضوئية من الشمس. وللتدليل على إمكانات هيباركوس نسوق حالة النجم (٧٠ فيرجينيس). فالتقديرات المبنية على القياسات الأرضية كانت شديدة التباين حيث تراوحت بين تسع وعشرين وبين مائة واثنين سنة ضوئية. أما القمر الصناعى هيباركوس فقد رصد ذلك النجم بدقة وحدد مسافته بتسع وخمسين سنة ضوئية بنسبة خطأ واحد بالمائة؛ أى مسافة نصف سنة ضوئية تقريبًا.

طريقة نقطة التلاقى

لكن منذ قرن مضى، لم يكن لدى الفلكيين أقمار صناعية وكان عليهم إذن العثور على منهج آخر لقياس المسافات الأكبر من مائة سنة ضوئية. وقد توصلوا إلى ذلك بابتكار تقنية جديدة تدعى طريقة نقطة التلاقى، وكانت ترتكز على قياس التحركات الظاهرية لبعض النجوم.



موضع وسرعة نجوم تجُمع (القلاص) بقياسه عبر القمر الصناعى هيباركوس. توضح كل من الدوائر الصغيرة الموضع الحالى لكل نجم وتوضح الخطوط مواضعها فى المائة ألف سنة القادمة. ويتواجد ذلك التجمع على بعد مائة وخمسين سنة ضوئية مِنَّا.

وتتحرك أغلبية نجوم التجمع فى نفس الاتجاه؛ ولكن بإسقاطها على القبة السماوية فإنها تبدو كأنها تتجه إلى الالتقاء عند نقطة واحدة.

لقد رأينا أن النجوم ليست ثابتة لكن تتحرك فى السماء. تلك التحركات الزاوية القابلة للرصد من الأرض لا تشكل إلا جزءًا من الحركة الحقيقية للنجوم. فإذا كان على سبيل المثال ثمة نجم يتنقل باتجاه الأرض فسيبدو لنا ثابتًا فى

السماء. ومن ثَم، فإن الحركة الحقيقية لنجم ما يمكن تحليلها لمكونين: حركة تماسِّية يمكن حسابها بقياسات للموقع، على غرار المذنب هالى، وحركة فى اتجاه القطر أو اتجاه خط البصر، ويمكن تقدير قيمتها بمساعدة تأثير دوبلر المنبعث عنها.

وتنطبق طريقة نقطة التلاقى على التجمعات المفتوحة، وهى مجموعات النجوم المكونة من العشرات أو المئات منها مثل القلاص والثريا. إن نجوم مثل ذلك التجمع تكون مرتبطة بقوة وتتحرك كلها فى نفس الاتجاه. لكن بالإسقاط على القبة السماوية، فإنها تبدو كما لو كانت تلتقى عند نقطة واحدة، تماما مثل جانبَى الطريق يخال للمرء أنهما يتقاربان من بعضهما البعض كلما بعدت المسافة حتى يتلاقيا عند الأفق. وإذا كان موضع نقطة التلاقى معروفا، وكذلك السرعات التماسية والقطرية لكل نجوم التجمع فإنه يمكن، بالاستعانة ببعض القوانين الهندسية، تحديد مدى بعد التجمع النجمى. باستخدام ذلك المنهج، اكتشف الفلكيون على سبيل المثال أن تجمع "القلاص" موجود على بُعْد مائة وخمسين سنة ضوئية من الشمس. وبوجه العموم، فقد أتاحت تلك التقنية الحصول على نتائج مقبولة حتى مسافة ثلاثمائة سنة ضوئية.

إضاءة النجوم وحرارتها

شدة الإضاءة المطلقة للنجوم

فلتتخيل أنك تائه فى صميم الليل بوسط الصحراء. وتظهر نقطة ضوئية فجأة من بعيد. ما هى تلك النقطة؟ هل مصدرها مصباح جيب على بعد مائة متر أم كشاف قوى على بعد عشرة كيلومترات؟ فى صميم الليل ودون أى صوت أو معلومات أخرى، فإنه من المستحيل بالنسبة لك تحديد مسافة تلك النقطة الضوئية أو طبيعتها.

إنها نفس المسألة بالنسبة للأجرام السماوية. فنجم قليل الإضاءة قريب من الأرض يمكن أن يتجاوز فى بريقه نجما شديد الإضاءة ولكن بعيد. ينبغى إذن

التمييز بين مفهومين: الإضاءة الظاهرية التى تعنى مدى لمعان النجم حسبما يبدو من الأرض، وبين شدة الإضاءة الأصلية أو المطلقة وهى الكمية الحقيقية للضوء الذى يبعثه النجم. الكَمُّ الأول يرتهن بقوة ببعد الجرم ولا يوفر بالتالى معلومات مباشرة حول طبيعة ذلك الجرم. أما الكم الثانى فهو لا يرتهن إلا بالجرم نفسه، ومن ثم يوفر لنا معلومات حول طبيعة الجسم المعنى وهو الذى ينبغى السعى إلى تحديده.

وتكمن الصعوبة بالنسبة لعالم الفلك فى الواقع أنه من الأرض لا يمكننا الوصول إلا للإضاءة الظاهرية للنجوم. هل يوجد إذن وسيلة للحصول على كَمَّات مطلقة من شأنها إفادتنا بشأن طبيعة النجوم؟ هنا تتدخل طرق قياس المسافات التى أوردناها آنفًا. يعلم الفيزيائيون منذ وقت طويل أن كثافة إشعاع ما تتبع قانونا محددا مؤداه إن كثافة الضوء تقل بمثل مربع نسبة تغير المسافة التى يقطعها الضوء. وذلك يعنى أننا لو قسنا اللمعان الظاهرى لمصباح على بعد مسافة ما ثم ضاعفنا تلك المسافة للمثلين، فإن لمعان المصباح سيضعف بنسبة أربع مرات من الأول. ويتيح ذلك القانون ببساطة تحديد الصلة الموجودة بين شدة الإضاءة المطلقة ومسافة النجم واللمعان الظاهرى له. ومن ثم، لو أمكن قياس اثنين من هذه العناصر فإن الثالث يمكن حسابه بسهولة. بالتالى لو أمكن تحديد مسافة نجم ما، يكفى قياس لمعانه الظاهرى ثم تطبيق العلاقة الرياضية لتحديد شدة إضاءته المطلقة.

وبدأت عمليات الرصد من ذلك النوع منذ توافرت المعطيات حول مسافات النجوم. لقد غطت هذه العمليات نطاقا واسعا فى إطار موجات الإضاءة المتاحة. فعلى صعيد النجوم ذات الإضاءة الأضعف، ظهرت أجرام لا تتجاوز شدة إضاءتها نسبة واحد إلى عشرة آلاف من شدة إضاءة الشمس. وفى المقابل تم الكشف عن نجوم عملاقة بحق تبث مليون مرة أكثر من طاقة نجمنا. وتم الكشف عن نطاقات شاسعة للإضاءة بتفاوت فى النسب بين الإضاءة الصغرى والعظمى يصل إلى واحد إلى مليار.

درجة حرارة النجوم

ومن الممكن بسهولة تحديد درجة حرارة نجم بفضل التحليل الطيفى. فيكفى إيجاد الطول الموجى لضوء النجم فى شدته القصوى وتطبيق قانون وين الذى يربط بين الطول الموجى والحرارة. فلنلحظ رغم ذلك أن ثمة ما يبعث على التروِّى، فالحرارة التى تم حسابها بهذا الشكل هى الحرارة السائدة فى الطبقات السطحية للنجم بما أنه منها ينبعث الإشعاع الذى يتم تحليله. أما الحرارة فى جوف النجم فهى ليست قابلة للقياس بشكل مباشر، ومن المحال تقديرها إلا بمساعدة نماذج نظرية.

وأظهرت عمليات الرصد الطيفية أن التباين فى حرارة السطح أقل بكثير منه فى حالة الإضاءة. فالنجوم ذات الحرارة الأدنى تكون حمراء اللون وحرارتها تبلغ نحو ثلاثة آلاف درجة كلفين، بينما النجوم ذات الحرارة القصوى تكون زرقاء اللون وتصل حرارتها إلى خمسين ألف كلفين. النسبة إذن بين درجات الحرارة القصوى والدنيا لا تزيد على عشرة.

ويذكر أن حالة مختلف الغازات على سطح النجم ترتهن بشدة بالحرارة السائدة به. من هذا المنطلق فإن التحليل الطيفى لنجمين مختلفين فى درجة الحرارة يكشف عن سمات تتيح تمييزهما بسهولة. تلك الخاصية قادت الفلكيين فى نهاية القرن الماضى لتصنيف النجوم فى شرائح مختلفة وفقًا لسمات طيفها. تلك الشرائح، التى تُدعى الأنواع الطيفية يرمز لها بالأحرف التالية: (O) و(B) و(A) و(F) و(G) و(K) و(M). النوعان الأولان ينسبان لدرجات الحرارة الأكبر من عشرة آلاف كلفين وطيفهما تسوده إشعاعات الهليوم. والنوع (A)، أقل قليلاً من عشرة آلاف كلفين، يتعلق بإشعاعات الهيدروجين. والأنواع (F) و(G) و(K) تتضمن درجات الحرارة بين ثلاثة آلاف وخمسمائة (٣٥٠٠) وسبعة آلاف وخمسمائة (٧٥٠٠) كلفين وتكشف عن طيف الكالسيوم. وأخيرًا النوع (M)، أقل من ثلاثة آلاف وخمسمائة كلفين، فيمثل أطيافًا تسودها نطاقات، أى إشعاعات شديدة الاتساع ترجع إلى بعض الجزيئات وبشكل خاص أكسيد التيتانيوم.

الرسم البيانى لهرتزسبرنج – راسل

ولقد كان من شأن الخاصيتين اللتين درسناهما، وهما شدة الإضاءة المطلقة وحرارة السطح، أن مكَّنتا علماء الفلك من أحد مفاتيح فهم النجوم. فى بداية القرن، كشف الدانمركى إجنار هرتزسبرنج والأمريكى هنرى راسل، كُلٌّ على حدة، عن وجود علاقة وثيقة بين شدة الإضاءة المطلقة وحرارة سطح النجوم. ومن ثَم استخدموا المعطيات المتاحة فى تلك الفترة وتوصلوا لفكرة جيدة تتمثل فى رسم بيانى يوضح العلاقة بين الخاصيتين.

ومن خلال هذا الرسم البيانى اتضح لهرتزسبرنج وراسل أن الأغلبية العظمى من النجوم تقع فى هذا الرسم على خط قطرى مائل يدعى خط التتابع الرئيس، يتضمن نطاقا عريضا من النجوم ابتداء من النجوم الباردة قليلة الإضاءة وحتى النجوم الساخنة شديدة الإضاءة.

وفضلا عن ذلك النطاق، ثمة ثلاث مجموعات أخرى منها مجموعتان موجودتان فوق خط التتابع الرئيس، تتسم النجوم بهما بإضاءة أكبر وهما مجموعة المتعملقات الحمراء، ومجموعة فوق المتعملقات الحمراء. والمجموعة الثالثة تقع تحت خط التتابع الرئيس، ونجومها ذات إضاءة أضعف وهى المتقزمات البيضاء. وسوف نتناول لاحقًا أصل تلك الشرائح الأربع ونرى أنها تقترن فى الواقع بمراحل محددة من حياة النجوم.

حجم النجوم وكتلتها

حجم النجوم

فى عام ١٨٧٩، اكتشف الفيزيائى النمساوى جوزيف ستيفان، المتخصص فى دراسة إشعاع الأجسام الساخنة، أن الطاقة الكلية التى يبثها جسم ما تتناسب مع الأُسّ الرابع لحرارته المطلقة. وهذا يعنى، على سبيل المثال، أن جسمًا ذا درجة حرارة ستمائة كلفين يبث ستة عشر مثل مقدار الطاقة التى يبثها

عند درجة حرارة ثلاثمائة كلفين. وطرح ستيفان كذلك قانونًا أشمل يحدد شدة الإضاءة التى يبثها جسم ذو سطح محدد وذو درجة حرارة معينة.

ولقد شكل قانون ستيفان أداة بسيطة نسبيا لعلماء الفلك تتيح لهم حساب حجم النجم إذا توافر قياس درجة الحرارة وشدة إضاءته المطلقة عبر الرصد. وبمعرفة حرارة سطح ذلك النجم، يمكن استخدام ذلك القانون لحساب الإضاءة الكلية المنبعثة من مساحة معينة من سطحه، ومن ثم تكفى مقارنة تلك النتيجة مع مقدار الإضاءة المطلقة المنبعثة من الجسم كله لحساب مقدار سطح النجم؛ وبالتالى حجمه.

ولقد أتاح ذلك المنهج الحصول على نتائج جيدة للغاية. فقد أوضح أولا أن نجوم خط التتابع الرئيس ليست كلها بنفس الحجم؛ وإن كان يمكن تجميعها فى نطاق ضيق نسبيا. ومن هذا المنطلق يمكن القول بأن حجم النجوم الساخنة يناهز عشرة أمثال حجم الشمس، فى حين أن النجوم الباردة لا يبلغ حجمها سوى عُشْر حجم الشمس. والمجموعات الأخرى فى الرسم البيانى لهرتزسبرنج راسل تنطوى على أحجام شديدة التباين. فالمتعملقات الحمراء، أحجامها تناهز عشرات ومئات المرات مثل حجم الشمس، أما النجوم فوق المتعملقات الحمراء، فقد تصل فى حجمها إلى ألف مرة أكبر من نجمنا. الإضاءة الهائلة لتلك النجوم ترتبط إذن بحجمها الهائل. وفى نهاية المطاف، نجد المتقزمات البيضاء بشكل عام أصغر فى حجمها مائة مرة من الشمس، وهو ما يجعلها فى مثل حجم الأرض ويفسر إضاءتها الضعيفة.

ثنائيات النجوم

وكان تحقيق الأمل بالوصول إلى فهم كامل لطبيعة وتطور النجوم، يقتضى أن يكون بوسع علماء الفلك تحديد خاصية أخيرة هى كتلة النجوم. وهذه خاصية يصعب كثيرا تحديدها لأن لا قياسات الإضاءة ولا التحليلات الطيفية تفيد فى ذلك. الحل الوحيد هو اللجوء لعلم مواقع النجوم أى القياس

الدقيق للمواقع النجمية وتطبيقها على ما نسميه النظم المزدوجة، وهى ثنائيات من النجوم يدور كل منهما حول الآخر ويربطهما الشد الجذبوى المتبادل.

ولقد أشرنا فيما سبق أن هناك فى المجموعة الشمسية علاقة بين حجم وطول الدورة لكل مدار كوكبى. ذلك القانون يدعى ثالث قوانين كبلر ويصل بين الخاصيتين السالف ذكرهما وبين كتلة الشمس. هذا القانون يمكن تعميمه على كل الأجرام التى تتحرك فى مدار، وبشكل خاص على طرفى الثنائيات النجمية، على أن يُستعاض عن كتلة الشمس بالكتلة الكلية للثنائى النجمى. ومن هذا المنطلق، لو أمكن بالرصد قياس زمن الدورة وحجم الثنائى النجمى، فإن تطبيق ذلك القانون يتيح مباشرة حساب الكتلة الكلية لهذا الثنائى.

كان ينبغى إذن على علماء الفلك أن يسعوا إلى البحث فى السماء عن أى ثنائيات نجمية وقياس زمن دورتها وحجم مدارها. إن كل ذلك يبدو نظريا بسيطا للغاية، لكن ثمة مشكلات ضخمة تظهر ما إن ننتقل إلى التطبيق العملى. المشكلة الرئيسة فى مثل تلك القياسات تكمن فى واقع أن التحركات المرئية للنجوم بطيئة للغاية وزمن الدورات قد يمتد لمئات السنين، الأمر الذى قد يقتضى تتابع عدة أجيال من الفلكيين لاستكمال مثل تلك الدراسة. وينبغى من جانب آخر أن يكون حساب حجم المدار سهلاً نسبيًا لو توافر الحجم الزاوى للثنائى برصده من الأرض ومسافته. لكن هنا أيضًا تظهر صعوبات لأن المدارات تكون فى معظم الحالات مائلة بالنسبة لخط بصرنا؛ ولهذا السبب فإن ما نرصده ليس سوى مسقط للمدار وهو ما يؤدى لأخطاء فى تقدير الأبعاد.

ولو تم التغلب على هذه المعوقات ونجحت عمليات الرصد بشكل جيد، فإن المنهج السابق ذكره الذى يستخدم قانون كبلر يمكن أن يؤدى إلى حساب الكتلة الكلية للثنائى النجمى. ولتحديد كتلة كل واحد من نجمَى الثنائى ينبغى على عالم الفلك كذلك التعمق أكثر فى دراسة تفاصيل حركة النجمين. الأمر الذى يتيح له تحديد نسبة كل نجم فى إجمالى كتلة الثنائى، ويمكنه فى نهاية المطاف الحصول على كتلة كل نجم على حدة.

كتلة النجوم

لقد أُجريت دراسات من ذلك النوع على العديد من النجوم. وقد كشفت أولاً أن كلاً من مجموعات الرسم البيانى هرتزسبرنج ـ راسل لها خواص مختلفة. فقد اتسمت كتلة النجوم فى خط التتابع الرئيس بنطاق واسع من التباين، ابتداء من أقل من عُشْر كتلة الشمس وحتى بضع عشرات أمثالها. والمجموعات الأخرى لها نطاقات أضيق، فالنجوم فوق المتعملقة الحمراء كتلتها نحو عشرين مثل كتلة الشمس، فى حين أن المتقزمات البيضاء كتلتها تقارب كتلة الشمس.

الاستنتاج الثانى المهم من ذلك النوع من الدراسات هو الكشف عن علاقة بين الكتلة والإضاءة المطلقة بالنسبة لنجوم التتابع الرئيس: كلما كان النجم كبير الكتلة ازداد تألقا. من هنا يتضح أن العامل الأساسى الذى يحدد موضع نجوم خط التتابع الرئيس فى الرسم البيانى هو الكتلة. فالكتلة هى التى تحدد الخواص مثل الإضاءة وحرارة السطح. والواقع أن هذه العلاقة بين الكتلة والإضاءة ليست غريبة، بل هى علاقة طبيعية، فكلما زادت كتلة النجم كان وزن طبقاتها الخارجية أكبر. وفى جوف الجرم، لا بد للضغط الذى يتحمل ذلك الوزن أن يكون أقوى. الأمر الذى يقتضى أن تجرى التفاعلات النووية بمعدل أعلى، مما يؤدى إلى تحرير طاقة أكثر كثافة وشدة إضاءة أعلى.

مصدر طاقة النجوم

وبعد أن توافرت هذه المعطيات حول النجوم، إضاءتها وحرارتها وحجمها وكتلتها، كان على علماء الفيزياء الفلكية العمل على تجميعها فى نموذج متماسك ووضع نظرية بشأن تكوين النجوم وتطورها.

وجرت الخطوات الأولى فى هذا الاتجاه فى مطلع القرن، وقام بها الألمانى كارل شفارتزشيلد والبريطانى آرثر إدينجتون. فقد قرر الأول دراسة مسلك كرة من الغاز من خلال تطبيق قوانين الفيزياء المعروفة فى تلك الفترة.

ونجح فى التوصل للتوصيف الرياضى الأول لأحد النجوم، وفى استنتاج الخصائص الأساسية للتكوين النجمى. وبعد ذلك بقليل، أكمل إدينجتون ذلك العمل مع الأخذ فى الحسبان ببعض العوامل التى تجاهلها شفارتزشيلد. ونجح بشكل خاص فى أن يُظهر بشكل نظرى أنه لا بد من وجود صلة ما بين الكتلة وإضاءة نجوم خط التتابع الرئيس، وهو ما تم التحقق منه بوضوح بعد ذلك عبر عمليات الرصد على نحو ما أسلفنا.

لكن تلك النماذج لم تُتِحِ التوغل فى التفاصيل لأبعد من ذلك، لأنه كان ينقص فى تلك الفترة معلومة أساسية هى طبيعة مصدر طاقة النجوم. ففى الواقع، يحتاج النجم لكَمّ كبير من الطاقة حتى لا ينهار تحت تأثير وزنه الخاص ولكى يستمر فى البريق. لكن من أين يأتى ذلك الكم؟ وكانت تلك المسألة تشغل بال الفلكيين لوقت طويل وبشكل خاص منذ أن أظهرت الدراسات الجيولوجية أن الأرض والشمس تبلغان من العمر على الأقل مئات الملايين من السنين. فذلك الأمر يقتضى أن يكون مصدر مثل هذه الطاقة معمرًا بما يكفى لأن يظل نجمنا يتألق طوال هذا الزمن.

وكان الافتراض الأول مبنيا على الأصل الكيميائى. هل تحترق الشمس مثل ركام من الخشب؟ لكن الحسابات أظهرت أن ذلك مستحيل. فحتى مع تصور توافر أفضل المواد القابلة للاشتعال فإن التقديرات النظرية لزمن حياة الشمس ما كانت لتصل سوى لآلاف أو عشرات الآلاف من السنين، وهو ما يقل كثيرًا عن التقديرات المطروحة.

وفى نهاية القرن التاسع عشر، طرح العالمان البريطانى لورد كلفين والألمانى هرمان فون هلمهولتز تفسيرًا آخر، مؤداه أن الشمس تنكمش شيئًا فشيئًا مع مرور الوقت وتحول طاقتها الجذبوية لحرارة. غير أن تلك الأطروحة لم تكن بأفضل من سابقتها كثيرًا، فلو كان الأمر كذلك لما عاشت الشمس لأكثر من بضع عشرات من الملايين من السنين، وهى حياة ما زالت قصيرة للغاية.

التفاعلات النووية

ولقد ظل مصدر طاقة الشمس يشكل لغزًا حتى بداية الثلاثينيات إلى أن تم الكشف عن طبيعتها فى نهاية المطاف؛ إنها التفاعلات النووية التى تحدث فى جوف نويات نجمنا.

إن المادة تتكون من وحدات ميكروسكوبية تُدعى الذرات. وتلك الأخيرة تتكون هى نفسها من جزيئات أصغر هى الإلكترونات والبروتونات والنيوترونات. والإلكترونات مسئولة عن التفاعلات الكيميائية وحركتها التى لا تتوقف تؤدى لمولد نوع من السحابة الإلكترونية التى تحدد حجم الذرات وهو جزء من عشرة مليارات من المتر. وفى قلب الذرة، توجد النواة وهى مجموعة تضم جزيئات تدعى بروتونات ونيوترونات. والنواة مضغوطة للغاية حيث يقل حجمها بمقدار مائة ألف مرة عن حجم الذرة نفسها. وليس للنواة تأثير مباشر على الخواص الكيميائية للذرة، لكنها هى التى تتدخل إبان التفاعلات النووية.

وبفعل درجات الحرارة المرتفعة التى تسود فى مركز الشمس، فإن كل الجزيئات تكون فى حالة اضطراب شديد. والذرات لا يمكنها أن تبقى على شكلها الاعتيادى، لأن الإلكترونات والنويات ترفضان الانضمام معًا. وتتأيَّن بذلك المادة أى تصير مكونة من إلكترونات وأنوية حرة، والاصطدامات بين الجزيئات تكون كثيرة جدا. وفى خِضَمِّ تلك الاصطدامات يمكن لنواتين أن تلتصقا ببعضهما البعض وتندمجان لتتولد عنهما نواة جديدة: إنه نوع من التفاعل النووى.

ولما كانت الشمس مكونة أساسا من الهيدروجين، فإن معظم التفاعلات تكون بين البروتونات البسيطة. وسوف نعود لاحقًا بالتفصيل لوصف تلك التفاعلات، لكن فلنضع فى أذهاننا الآن أن نتيجة هذه التفاعلات هى تحول أربعة بروتونات إلى نواة هليوم واحدة تتكون من نيوترونين وبروتونين. وتكمن السمة الملحوظة لذلك التفاعل فى أن كتلة نواة الهليوم تكون أقل بشكل طفيف

من مجموع كتلة البروتونات الأربعة. وهذا يعنى أن التفاعل النووى الاندماجى يكون إذن مصحوبًا بفقْد فى الكتلة.

وفى بداية القرن، أثبت الفيزيائى الألمانى ألبرت أينشتاين بنظريته عن النسبية أن الكتلة والطاقة هما قيمتان متكافئتان. ووضع قانونه الشهير ($E=mc^2$)؛ وهو يعنى أن الطاقة (E) تساوى حاصل ضرب الكتلة فى مربع سرعة الضوء. فى مركز الشمس، فإن فقد الكتلة الذى يصاحب تحول أربعة بروتونات لنواة هليوم، يقترن بتحرر جزء من الطاقة. من هذا المنطلق نقول بأن الشمس، بتحويلها نسبة من كتلتها، توفر لنفسها الموارد اللازمة لها. ذلك المنهج فعال أكثر من منهج التفاعلات الكيميائية أو انكماش كلفين هلمهولتز، فهو يسمح لنجم مثل الشمس بالتألق لمدة عشرة مليارات من الأعوام.

نوعان من التفاعلات

وتحول الهيدروجين لهليوم يمكن أن يتم بطريقتين مختلفتين. الأولى التى طرحها الفلكى الأمريكى شارل كريتشفيلد، تدعى سلسلة (بروتون- بروتون). يبدأ الأمر باثنين من البروتونات يندمجان فيكونان الديتريوم، أى نواة مشكَّلة من بروتون ونيوترون. ثم يقابل الديتريوم بعد ذلك بروتونًا ثالثا؛ الأمر الذى يسفر عن تكون نواة (هليوم-٣) المكونة من بروتونين ونيوترون واحد. وبدءا من هنا يمكن لسلسلة (بروتون- بروتون) أن تتخذ أحد مسارين مختلفين. فى الحالة الأكثر شيوعا، تلتقى نواتا (هليوم-٣) وتنتجان نواة (هليوم-٤) مكونة من بروتونين ونيوترونين مع تحرير البروتونين المتبقيين. وقد يحدث أن تلتقى نواة (هليوم-٣) ونوة (هليوم-٤) فتندمجان لتكوِّنا نواة (بيريليوم-٧). وتتعرض تلك النواة لعدة تحولات لتتفكك فى نهاية المطاف لنواتَىْ (هليوم-٤)؛ الأمر الذى يعنى أنه فى الحالتين تئول السلسلة (بروتون- بروتون) إلى نواة هليوم انطلاقًا من أربعة بروتونات.

الطريقة الأخرى لتحويل الهيدروجين لهليوم تدعى دورة الكربون. وقد اكتشفها فى عام ١٩٣٨ اثنان من العلماء كُلٌّ على حدة؛ وهما الأمريكى هانز بيث والألمانى كارل فون ويزكر. وتبدأ الدورة باصطدام بروتون مع نواة (كربون–١٢) وهو ما لم يكن ليحدث إلا إذا كان هناك كربون موجود بالفعل بالنجم. وتنشأ بذلك نواة (نتروجين–١٣) وسرعان ما تتحول لعنصر (كربون–١٣). وذلك الأخير يندمج مع بروتون ثانٍ لينتج (نتروجين–١٤) ثم مع بروتون ثالث ليتولد (الأكسجين–١٥). تلك النواة الجديدة تتحول إلى (نتروجين–١٥) ومع الالتقاء ببروتون رابع تتفكك النواة فى نهاية المطاف لتنتج (الهليوم–٤) ونواة (كربون–١٢) مطابقة لتلك التى بدأت الدورة. بهذا الشكل، يعود الكربون للتشكل فى نهاية الدورة لكن فى هذه الأثناء تكون أربعة بروتونات قد تجمعت فى نواة هليوم. والنتيجة هنا تماثل ما أسفرت عنه سلسلة (بروتون– بروتون)، والكربون لم يكن له دور إلا تسهيل مختلف التفاعلات، ويمكن بالتالى اعتباره مثل مُحفِّز.

ونسبة الطاقة التى تعود على كل من تلك العمليتين ترتهن بمقدار الحرارة فى جوف النجم؛ وبالتالى بكتلته. والنجوم التى تقل كتلتها عن مثلَىْ كتلة الشمس تكون حرارتها الداخلية منخفضة نسبيا. وبالتالى يكون إنتاج الطاقة بها وفقا لمنهج سلسلة (بروتون– بروتون). أما النجوم الثقيلة فهى أكثر سخونة، وهو ما يجعل دورة الكربون فعَّالة جدًا لدرجة أنها توفر طاقة النجم بشكل شبه كامل.

خط التتابع الرئيس

لقد رأينا أن الرسم البيانى هرتزسبرنج – راسل تضمن خطًا وتريًا يحتوى على معظم النجوم؛ إنه خط التتابع الرئيس. وقد أظهرت الدراسات النظرية أن نجوم ذلك التتابع هى تلك التى تستخدم أسلوب اندماج الهيدروجين وتحوله

لهليوم كمصدر للطاقة. ولما كان هذا الطور فى حياة النجوم هو الأكثر استقرارًا والأطول، فهو يفسر لماذا توجد غالبية النجوم القابلة للرصد على خط التتابع الرئيس.

وترتهن فترة حياة نجم ما على خط التتابع الرئيس بعاملين: كَمّ الهيدروجين المتوافر فى جوفه والسرعة التى يحترق بها ذلك العنصر المشتعل. والكَمُّ الأول يتناسب مع كتلة النجم. فلو ضاعفت الكتلة إلى مثلين ستحصل على مثلَىْ كمّ المادة المشتعلة فى جوفه. العامل الثانى يرتبط بالطاقة التى ينتجها النجم فى وقت محدد، وبالتالى بشدة إضاءته. وفى المقابل، رأينا فيما سبق أن شدة الإضاءة لا تتناسب بشكل طردى مع الكتلة فحسب وإنما تزيد بمعدل أسرع كثيرًا من هذا. فعلى سبيل المثال، لو ضاعفت كتلة نجم ما إلى المثلين فإن شدة إضاءته ستتضاعف إلى عشرة أمثال.

تلك الاعتبارات لها نتائج مهمة فيما يتعلق بفترة الحياة النجمية. فنجم بمثلى كتلة الشمس يُحرق الهيدروجين به أسرع عشر مرات من الشمس، لكنه لا يمتلك مخزونا من العناصر القابلة للاشتعال إلا بمقدار المثلين. وفترة حياته فى التتابع الرئيس تكون بالتالى خمس مرات أقصر. بهذا الشكل، فإن النجوم لها فترة حياة شديدة التنوع. وفى حين أن الشمس قد تأمل فى حياة هادئة تمتد لعشرة مليارات من الأعوام، فإن النجوم الأكبر كتلة لا تمتلك سوى عدة ملايين من السنوات. أما النجوم الأقل كتلة فقد تمتد حياتها لمائة مليار عام. هناك إذن نسبة تناهز عشرة آلاف بين تقديرات طول أمد الحياة للنجوم الأطول والأقصر عمرًا.

التتابع الرئيس أداة: عمر التجمعات النجمية

لقد رأينا كيف أن الفلكيين كانوا قد نجحوا فى تحديد العديد من خصائص النجوم مثل شدة الإضاءة أو الكتلة. غير أن ثمة خصائص أخرى لا يتسنى تحديدها بشكل مباشر وفى مقدمتها عمر النجوم. ومع ذلك هناك حالة يمكن

تحقيق ذلك فيها، وهى حالة نجوم التجمعات النجمية. وذلك ممكن لأن كل النجوم المنتمية للتجمع النجمى قد ولدت فى نفس الوقت ولها بالتالى نفس العمر.

لفهم كيف يمكن لتلك الخاصية أن تكون شديدة النفع فلندرس عدة أمثلة. ولنبدأ بتجمع نجمى شاب للغاية يبلغ عدة ملايين من السنوات. ولكون طور التكون كان قصيرًا نسبيًا فبالتالى تنضم كل نجوم التجمع لخط التتابع الرئيس. ونظرًا لأن حتى النجوم الأكبر كتلة تبقى على ذلك الخط حتى عشرات الملايين من الأعوام، فإن كل نجوم التجمع ما زالت منتمية إليه. التتابع الرئيس لتجمع نجمى شاب يكون بالتالى كاملا ويضم نجومًا زرقاء وحمراء.

ولننتقل إلى تجمع أقدم قليلاً عمره عدة عشرات الملايين من السنين. فى تلك الحالة فإن النجوم الأكبر كتلة تكون قد غادرت بالفعل خط التتابع الرئيس، وسيكون ذلك التتابع مكتظًا بالنجوم فى جانبه الأزرق فى حين يكون عدد من المتعملقات الحمراء قد بدأ فى الظهور. أما فى حالة تجمع يبلغ عمره مليارًا من السنوات، فإن كل النجوم ذات الكتلة الأكبر مرتين من كتلة الشمس تكون قد غادرت التتابع الرئيس، واستقرت عند الجانب الأعلى من الرسم البيانى، فى حين تظهر العديد من المتعملقات الحمراء وأيضا المتقزمات البيضاء. وفى نهاية المطاف، سيكون من شأن تجمع يبلغ عشرة مليارات سنة أن يضم عددًا ضخمًا من المتعملقات الحمراء. وأن يكون له خط تتابع مقصور على عدد محدود من النجوم الضاربة إلى اللون الأحمر؛ فضلاً عن عدد كبير من المتقزمات البيضاء.

وبذلك يتبدَّى لنا أن تركيبة الرسم البيانى لتجمع نجمى سيرتهن إلى حد كبير بعمر ذلك التجمع. يكفى فى الواقع تحديد النجوم الأكبر كتلة أو الأكثر سخونة التى لا تزال موجودة فى التتابع الرئيس للحصول على تقدير محدد حول عمر التجمع ومكوناته.

المتعملقات الحمراء

التتابع الرئيس هو المرحلة التى يستمد النجم طاقته خلالها من تحول الهيدروجين لهليوم. ومخازن الوقود لا تكون بطبيعة الحال بلا نهاية، ومع مرور الوقت ينخفض تركيز الهيدروجين فى جوف النجم فى حين يزيد تركيز الهليوم.

النتيجة المهمة لذلك التغير هى الارتفاع الطفيف فى إضاءة النجم على مدى حياته فى طور التتابع الرئيس. فى الواقع، بما أن التفاعل النووى للهيدروجين يحول أربعة بروتونات لنواة هليوم واحدة، فإن عدد الجزيئات فى مركز النجم ينخفض؛ الأمر الذى يؤدى إلى انخفاض الضغط. ولمقاومة وزن الطبقات الخارجية فإنه يكون على النواة بالتالى أن تجد وسيلة لتعويض هذا النقص.

والحل المتاح هو أن تنكمش النواة بشكل طفيف، وهو ما يزيد من الضغط الداخلى ويستعيد النجم استقراره. لكن طبقات الهيدروجين القريبة من النواة، والتى لم تكن ساخنة بدرجة كافية لمواصلة التفاعلات النووية، تتعرض بسبب هذا الانكماش لارتفاع درجة حرارتها. وشيئا فشيئا تعود كمية الهيدروجين المندمج إلى الازدياد، وهو ما يُترجم بزيادة بطيئة فى إضاءة النجم.

وبعد طور طويل فى التتابع الرئيس، يأتى وقت فى نهاية المطاف يكون فيه تركيز البروتونات ضعيفًا للغاية فى مركز النجم بحيث لا يكون هناك ما يكفى من جزيئات لمواصلة التفاعلات النووية، ويتوقف احتراق الهيدروجين. ويتأزم الوضع فى جوف النجم، فبدون طاقة ينهار الضغط الداخلى ولا تجد قوى الجاذبية أى مقاومة فيختل توازن النجم ويبدأ جوف النجم فى الانكماش.

نشأة غلاف ضخم

ولحسن الطالع، فإن ذلك الانكماش يؤدى إلى مولد مصدرين جديدين من الطاقة. أولاً: النواة تكون قادرة حينذاك على تحويل جزء من طاقتها الجذبوية

لطاقة حرارية. ثانيًا: تظهر قوقعة من الهيدروجين وتدخل فى حالة اندماج نووى. فى الواقع، المنطقة التى كانت تحيط بالنواة كانت لا تزال غنية بالهيدروجين لأنها لا يحدث بها تفاعلات. وبسبب انكماش النجم، فإن تلك المنطقة تشهد ارتفاعا سريعا فى حرارتها وسرعان ما تبلغ المستوى الضرورى للانصهار. وبهذا يظهر حول النواة المنطفئة قوقعة رقيقة تستمر بداخلها تفاعلات انصهار الهيدروجين.

النجم يجد نفسه بهذا الشكل مزودا بمصدرين للطاقة شديدَى القوة. بسبب تلك الإضافة الجديدة من الطاقة ولأسباب لا تزال مجهولة، فإن طبقات الغاز التى تحيط بالنواة تندفع للخارج. وغلاف النجم يبدأ فى التمدد ويصبح الجرم سريعا نجما متعملقا. وتأتى زيادة حجم الغلاف على حساب الكثافة والحرارة به، فتنخفضان بدرجة كبيرة، وذلك يُترجم بتغير فى لون إشعاعه نحو الأحمر. ويهجر النجم مرحلة التتابع الرئيس ليدخل فى مجموعة أخرى فى الرسم البيانى لهرتزسبرنج راسل وهو طور المتعملقات الحمراء. وفى يوم ما، من الآن وحتى نحو خمسة مليارات سنة، سوف تشهد الشمس نفس المصير، حيث ستتحول لمتعملق أحمر يمتد ليشمل بالتتابع مدارات عطارد والزهرة والأرض. وذلك الحدث قد يعنى على الأرجح نهاية الحياة على كوكبنا.

اندماج الهليوم

وبينما يستمر الغلاف فى التمدد، فإن النواة، التى صارت تتشكل فى معظمها من الهليوم، ستستمر فى الانكماش. وتستمر كتلتها فى الزيادة بفضل الهليوم المضاف النابع من تفاعلات قوقعة الهيدروجين. ويتواصل هذا الحال إلى أن يأتى وقت تصل فيه الحرارة والكثافة إلى درجة تكفى لدخول أنوية الهليوم هى الأخرى فى التفاعلات النووية. فعند مائة مليون كلفين، تكون الظروف مجتمعة لأن تبدأ عمليات اندماج الهليوم وتشكل مصدرًا جديدا للطاقة بالنسبة للنجم.

وتُعرف عملية التفاعل المؤدية لتحول الهليوم، باسم (ثلاثية ألفا). وتبدأ هذه العملية بالتقاء نواتَىْ هليوم فتنصهران وتندمجان لتنتجا نواة (بريليوم-٨). وذلك المكون يتسم بدرجة كبيرة من عدم الاستقرار حتى إن التفاعل لا يمكن أن يستمر إلا لو نواة ثالثة من الهليوم تدخلت على التوّ واصطدمت مع النواة الجديدة، وهو ما لا يمكن حدوثه إلا فى ظل الظروف القصوى السائدة فى مركز متعملق أحمر. ونتيجة الاصطدام بين البريليوم والهليوم تتولد نواة كربون١٢ مستقرة. وثمة تفاعلات أخرى يمكن أن تحدث بعد ذلك. فمن الوارد أن تصطدم نواة الكربون -١٢ ليتولد (أكسجين-١٦). وهكذا تظهر عدة عناصر أخرى مثل (النيون-٢٠) أو (المغنسيوم-٢٤).

لكن الهليوم، شأنه شأن الهيدروجين، موجود بكمية محدودة. ولا مفر من أن ينتهى فى نهاية المطاف فتتوقف عملية الاحتراق لنقص الوقود. والأحداث التى تجرى بعد ذلك الوقت سنتناولها لاحقًا. ولكن لنلحظ الآن أن فترة طور المتعملق الأحمر تقل عن فترة طور التتابع الرئيس. وبالنسبة لنجم مثل الشمس، فإن احتراق الهيدروجين يستمر لنحو عشرة مليارات من السنين، فى حين أن احتراق الهليوم لا يستغرق سوى ملياريْ سنة إضافية.

النجوم المتغيرة

إن نجوم التتابع الرئيس هى أجرام شديدة الاستقرار. وقوة الجاذبية التى تميل لجعل النجم ينكمش تعادلها بالضبط قوى الضغط الداخلى التى تميل لجعله يتمدد. وفى الوقت الذى يتحول فيه النجم إلى متعملق أحمر، يختل التوازن أحيانا. ويبدأ من ثَم طور لعدم الاستقرار يُترجم بتغيرات قوية فى إضاءة النجم.

ويأتى اختلال التوازن نتيجة ظاهرة معقدة تتجسد على هيئة تغيرات فى درجة شفافية طبقات الهليوم قرب سطح النجم. وانطلاقًا من هنا يبدأ الجرم فى

التعرض لتقلبات متتابعة من التمدد والانكماش تحت تأثير القوى التى كانت تحفظ فيما قبل التوازن. فحين تنتصر قوى الضغط الداخلية، يزيد حجم النجم، لكن الجاذبية تعرقل حركة التمدد ثم تتسبب فى الانكماش. ويستمر النجم ينكمش إلى أن يقل حجمه إلى دون المتوسط، فتعمل قوى الضغط الداخلى على مقاومة الانكماش إلى أن تنجح مرة أخرى فى إعادة التمدد.

وليست تغيرات الحجم هى التى تؤدى إلى تغيرات الإضاءة، لكن يُعزى السبب إلى تغيرات الحرارة. فحين يكون حجم النجم أقل من المتوسط، فإن حرارته تكون أكبر بشكل طفيف، وبالتالى تصل شدة الإضاءة إلى أقصى حد لها. وفى الحالة المقابلة، فإن الحرارة تقل بشكل طفيف عن المتوسط وتكون الإضاءة عند حدها الأدنى. ويتغير لمعان النجم بالتالى بشكل دورى، ومن هنا يُطلق على النجوم فى هذه المرحلة اسم النجوم المتغيرة.

أنواع النجوم المتغيرة

النوعان الرئيسان من النجوم النابضة المتغيرة هما القيفاويات ونجوم آر آر ليرا (النسر الواقع). تلك الأجرام تلعب دورًا محوريًا فى الفيزياء الفلكية، وسوف نلتقى بها فى العديد من المناسبات. القيفاويات هى نجوم كبيرة الكتلة ولن تكون غادرت مرحلة شبابها حين تصل لطور المتعملق الأحمر. وتتغير إضاءتها بشكل دورى تتراوح مدته بين يوم وعدة أسابيع. الخاصية الملحوظة للقيفاويات هى وجود علاقة بين إضاءتها المتوسطة ومعدل النبض. وعلى سبيل المثال، فإن إضاءتها المتوسطة تكون ألف مثل إضاءة الشمس فى فترة عدة أيام، وأكبر لعشرة آلاف مثل ذلك المقدار فى فترة عدة أسابيع. إنها تلك العلاقة التى تجعل من القيفاويات أداة أساسية فى الفيزياء الفلكية.

أما النجوم آر آر ليرا فهى أقل كتلة طاعنة فى القدم، وتقل دورة النبض بها عن يوم واحد. وعلى عكس القيفاويات، فإن شدة إضاءتها المتوسطة واحدة وتعادل نحو مائة مثل إضاءة الشمس.

وتجدر الإشارة فى نهاية المطاف أن هناك أنواعًا أخرى من النجوم المتغيرة لا يرجع تقلب إضاءتها إلى النبضات. الأمر إذن يتعلق بنظم مزدوجة تتكون من نجمين يدور كل منهما حول الآخر. لو كانت الأرض بالصدفة موجودة فى مستوى المدار المتبادل، للاحظنا إن كل نجم يمر أمام الآخر أثناء دورته ويخفى جزءًا من سطحه. بالنسبة للراصد من الأرض، فإن ذلك يُترجم بنقصان فى الإضاءة الكلية للثنائى النجمى. وبهذا الشكل، يتقلب اللمعان الكلى على مر الزمن ونكون أيضا أمام نجوم متغيرة. وفى مثل تلك الحالة التى لا تتكرر كثيرا، فإن دراسة تغيرات الضوء قد تكون مهمة للغاية حيث تتيح التوصل إلى معلومات حول النجمين من قَبيل حجم مدارهما وحجمهما وكتلتهما.

[٦]
نهاية حياة النجوم

السُدُم الكوكبية

فلنبدأ دراستنا بشأن موت النجوم بحالة النجوم صغيرة الكتلة، حيث تُشبَّه الظواهر التي تحدث بعد اشتعال الهليوم بها بالظواهر التي وصفناها آنفًا. فى مركز النجم، تحول التفاعلات النووية شيئًا فشيئًا الهليوم وتُحل محله الأكسجين والكربون وعناصر أخرى.

بيد أنه يأتى وقت لا تكون فيه كمية الهليوم بها كافية لمواصلة التفاعلات النووية، فتخمد تلك التفاعلات، وتحرم النجم بهذا الشكل من مصدر طاقته. ولهذا السبب، تنكمش النواة لكى تستفيد من طاقتها الجذبوية كمصدر جديد للطاقة. ويؤدى ذلك لانضغاط الجزء الداخلى من الغلاف، وهو الغنى بالهليوم، وتتهيأ الظروف بما يكفل بدء الاندماج النووى للهليوم. وتظهر قوقعة جديدة مشتعلة، مكونة هذه المرة من الهليوم.

ويزداد تكوين النجم تعقيدًا. ففى المركز، نجد نواة خامدة من الكربون والأكسجين، ومحاطة بقوقعة من الهليوم المنصهر تكون هى نفسها فى داخل طبقة من الهيدروجين المشتعل. ويكون الكل محاطا بغلاف هائل من

الهيدروجين غير المتفاعل؛ لأنه يكون باردًا جدًا. ويستمر ذلك الغلاف فى التمدد تحت تأثير تدفقات الطاقة النابعة من قوقعة الهليوم.

ذلك الطور من حياة النجوم يتسم بنشاط شديد. وتسود حالات عدم استقرار فى قوقعة الهليوم، وتؤدى لتولد نبضات للنجم. ومع كل من تلك التقلبات، ينفصل جزء من الغلاف ويندفع بعيدا، وبهذا الشكل يفقد النجم شيئا فشيئا كمية هائلة من المادة، قد تمثل فى بعض الحالات، نسبة كبيرة من الكتلة الكلية للنجم.

ويؤدى، عمليًا، إطلاق المادة المتلاحق إلى ترك النواة عارية. وبما أن تلك النواة تكون شديدة السخونة، فإنها تبث فوتونات فوق بنفسجية مشحونة بالطاقة، وتؤدى لتأيُّن الغاز الخاص بالغلاف المنفصل عن النجم. ويعيد ذلك الغاز بث الطاقة المتلقاة، على هيئة فوتونات، بطول موجى أكبر، وبشكل خاص فى المجال المرئى من الطيف. وبذلك يأخذ النجم بأكمله فى اللمعان، ويبدو كنواة ساطعة محاطة بغلاف ضوئى هائل. ويستمر ذلك الطور لنحو خمسين ألف عام حتى يتشتت الغاز وتصير كثافته فى نهاية المطاف واهية بحيث لا يُرى.

ولما كان انطلاق الطاقة يجرى بشكل مماثل فى كل اتجاه حول النجم، فهو يبدو على هيئة كُرِّية بحيث يخال للمرء الذى يستخدم أداة رصد صغيرة أنه يرى كوكبا حقيقيا. ولهذا السبب أطلق علماء الفلك فى الماضى على ذلك الطور اسم السديم الكوكبى. ومنذ عمليات الرصد الأولى لتلك الظاهرة، تم رصد أكثر من ألف من تلك الأجرام، لكن عددها الإجمالى فى مجرتنا يُقدر بعشرات الآلاف.

مبدأ عدم اليقين

قبل دراسة مصير نواة النجوم، ينبغى أن نحيد قليلا نحو الجانب النظرى لاسيما ما يتعلق بميكانيكا الكَمِّ. فلنتعرف على أحد الخصائص الرئيسة لتلك النظرية، وهو مبدأ عدم اليقين.

موضع الجُسَيْم وسرعته

فلنفترض أننا سنقوم بتقديم توصيف كامل لأحد الإلكترونات، أى تحديد مواصفات مثل وضعه أو سرعته. لأول وهلة، لا يمثل ذلك مشكلة، لأنه من المفترض أن يكون بوسعنا أن نقيس تلك الخصائص للإلكترون بدقة بالغة. وذلك من وجهة نظر علماء الفيزياء الكلاسيكية. لكن رأى علماء ميكانيكا الكَمِّ مختلف، إذ ينبغى فى كل توصيف لإحدى الظواهر الفيزيائية أن تؤخذ فى الحسبان عملية الرصد. وبذلك لا ينبغى أن نكتفى بالقول بأنه لا توجد أى صعوبة فى القياس، لكن بالعكس، علينا أن نتدارس بعناية الطريقة التى سنُجرى بها ذلك القياس.



وارنر هايزنبرج (1901 – 1926)، مبتكر مبدأ "عدم اليقين" (أو عدم التحديد)

فلنحاول إذن أن نقيس وضع وسرعة الإلكترون بشكل متزامن. إن أبسط وسيلة لذلك هى استخدام شعاع ضوئى. إننا لسنا مقيدين بنطاق الضوء

المرئى، حيث يمكننا أن نلجأ لكل أطياف الموجات الكهرومغناطيسية، من مجال الراديو وحتى أشعة جاما. فلنبدأ بشعاع راديوى ذى طول موجى يبلغ مترًا على سبيل المثال. إن المشكلة التى تطرح نفسها هنا هى أننا لا نستطيع تحديد وضع الإلكترون إلا بدرجة دقة فى حدود الطول الموجى. من هذا المنطلق لا يمكننا، باستخدام أشعة الراديو، تحديد الموضع إلا بدرجة دقة فى القياس لأقرب متر.

ولزيادة الدقة، فإن الحل بسيط؛ أن نذهب للجانب الآخر من الطيف الكهرومغناطيسى، ونستخدم أشعة جاما. ستكون الأطوال الموجية حينذاك صغيرة للغاية، ويمكن قياس موضع الإلكترون بدقة شديدة، تصل على سبيل المثال لجزء من مليون مليار من المتر. لكن ثمة مشكلة جديدة تطرح نفسها. فالفوتونات التى تكوّن شعاع جاما تكون مشحونة بالطاقة بشكل هائل. ومن ثَم يكون اصطدامها بالإلكترون عنيفا، بدرجة تربك حركة الجزىء؛ وبالتالى سرعته. لهذا السبب، فإن ثمة تشكُّكًا كبيرًا فى مدى صحة ودقة قياس تلك السرعة. ولدرء تعريض الجزىء لاضطرابات بحيث يمكن قياس سرعته بدقة، ينبغى اللجوء إلى أشعة ذات طاقة محدودة، أى إلى موجات الراديو، لنعود فى نهاية المطاف إلى الحالة السابقة، بما تتسم به من تواضع درجة الدقة فى قياس موضع الجزيئات.

إن الوضع يبعث على الالتباس، ويُعد ذلك أحد معالم ميكانيكا الكم المعروف تحت اسم مبدأ عدم اليقين: من المستحيل معرفة وضع وسرعة جزىء فى نفس الوقت وبدقة. قد يقودنا الشرح السابق، الذى يجسد أهمية فعل الرصد، للاعتقاد بأن الأمر يتعلق بكونها تجربة معملية وبأنه يمكن الاستعانة بتقنيات أكثر تقدما للتغلب على تلك العقبة. لكن ذلك ليس بصحيح. فمبدأ عدم اليقين هو خاصية أساسية للمادة، وليس مشكلة تجريبية. وتؤكد بوضوح ميكانيكا الكم، وهى التى تم التحقق من تكهناتها فى مرات عديدة، أنه لا يمكن فى وقت واحد تحديد موضع وسرعة أى إلكترون بدقة كبيرة. وليس من شأن عمليات الرصد سوى أن توضح تلك الخاصية.

لكن لعل المرء يتساءل قائلاً إن الأشياء فى الحياة اليومية تجرى بشكل أفضل، فمن الممكن على سبيل المثال تحديد سرعة وموضع سيارة بدقة كبيرة! لماذا لا تخضع تلك الأشياء لمبدأ عدم اليقين؟ فى الحقيقة، تخضع تلك الأشياء، بشكل مماثل، لذلك المبدأ، لكن ذلك ليس له تبعات واقعية. والسبب هو أن تلك الأشياء لها كتلة لا تُقارن بكتلة جزىء. فإذا كان بوسع الفوتون أن يؤثر على حركة إلكترون، وهو جسيم ذو كتلة لا تكاد تذكر، فإنه من المستحيل أن يربك جسمًا يزن عدة كيلوجرامات. وبالتالى، فإن عملية الرصد لا يكون لها تأثير. لهذا السبب، ليس لمبدأ عدم اليقين تأثير مباشر على حياتنا اليومية. ومن ثَم من الممكن، بالتأكيد، أن نحدد لأى جسم ماكروسكوبى (أى كبير الحجم) موضعًا وسرعة محددين. وفى هذه الحالة، فإن الإمكانات التكنولوجية هى التى تتحكم فى دقة القياس.

المتقزمات البيضاء

بعد ذلك التحول النظرى القصير، فلْنَر كيف يتدخل مبدأ عدم اليقين فى التطور النجمى. فلنُعد للنجوم فى فترة نهاية حياتها. لقد انتهت للتوِّ تفاعلات النواة وصارت خامدة وتتكون أساسا من الكربون والأكسجين. ولأن التفاعلات النووية توقفت، فإن الضغط الداخلى الذى كان يكفل استقرار النجم، يفقد قوته ويعجز عن إتمام مَهمَّته.

ويبدأ النجم فى الانهيار بفعل وزنه الخاص ويقل حجمه وتزداد كثافته بشكل كبير. ويأتى وقت تصل فيها الكثافة إلى مستوى يفسح المجال لأن ينطبق مبدأ عدم اليقين. فبفعل ضغط المادة، يكون كل إلكترون حبيس حيز صغير، ويكون موضعه لهذا السبب محددا بشدة. لكن وفقا لميكانيكا الكم، يكون الثمن هو حالة عدم يقين حول سرعة الجزىء، وهو ما لا يجوز إلا إذا كانت تلك السرعة نفسها كبيرة. وهذا يعنى أن الإلكترونات تكون فى حالة حركة سريعة للغاية، ومن شأن هذا النشاط أن يولِّد نوعًا جديدًا من قوة الضغط ذا أصل كمى بحت، ويُطلق عليه اسم ضغط التحلل الخلوى. وهذا الضغط يقاوم

اتجاه النجم إلى الانهيار، ويعيد التوازن فى مواجهة قوة الجاذبية، ويتحول النجم إلى متقزم أبيض.

وبفعل الضغط الشديد الذى تتعرض له المادة، تكون المتقزمات البيضاء أصغر وأكثر كثافة من النجوم العادية. ويصل قطرها فى المتوسط لنحو عشرة آلاف كيلومتر، أى مثل حجم الأرض، لكن بكتلة مثل كتلة الشمس. وتصل الكثافة لقيم خيالية تناهز الطن فى السنتيمتر المكعب للمادة. وهذا يعنى أن مقدارا من المادة فى متقزم أبيض، ملء ملعقة حساء تزن عدة أطنان. ويؤدى الحجم الصغير كذلك إلى ضعف الإضاءة. لهذا السبب، تشكل المتقزمات البيضاء مجموعة منفصلة فى الرسم البيانى هرتزسبرنج ـ راسل تحت التتابع الرئيس.

ولما كان الضوء المنبعث من المتقزمات البيضاء ضعيفا، فإنه يصعب اكتشافها، إلا إذا كانت على مقربة من الشمس. فى عام ١٨٤٤، لاحظ الفلكى الألمانى فريدريش بيزيل، أن النجم الألمع فى السماء، وهو الشِّعْرَى اليمانية (سايروس)، لم يكن ثابتا تماما فى السماء، لكنه كان يتأرجح بشكل طفيف. وقد أعزى ذلك التأثير إلى وجود نجم آخر، ضعيف الإضاءة، يؤثر شَدُّه الجذبوى على حركة سايروس. لكن كان ينبغى الانتظار حتى عام ١٨٦٢ لكى يلتقط الأمريكى ألفان كلارك، بمعدات رصد أحدث، صورة لذلك الرفيق سايروس (ب)، وهو أول متقزم أبيض يتم رصده. ومنذ ذلك الحين، تم اكتشاف نحو خمسمائة جرم من ذلك النوع، وهو ما لا يقارن بالعدد الكلى فى المجرة والذى يقدر بعشرة مليارات.

نهاية المتقزم الأبيض

وحين يتحول نجم ما لمتقزم أبيض، فإن حياته لا تتميز إلا بعدة تغيرات طفيفة. وبما أن الجرم لا يكون لديه مصدر للطاقة، فإن حرارته وإضاءته تنخفضان. ويتحول لونه من الأبيض للأحمر. ثم بعد عدة مليارات من السنين لا ينبعث منه أقل القليل من الضوء فى المجال المرئى. ويصير حينذاك متقزما أسود. ويتغير كذلك تكوينه الداخلى مع الوقت. وبعد الانهيار، تكون

الجزيئات فى حالة نشاط شديد، ويمكن لأيونات الكربون والأكسجين أن تتحرك بحرية. لكن مع انخفاض الحرارة، تفقد تلك الأيونات حريتها وتصطف بانتظام لتشكل شبكة بللورية. أما الإلكترونات فتستمر فى التنقل بحرية بسرعات تقترب من سرعة الضوء. وتجدر الإشارة، فى نهاية المطاف، إلى أن حجم النجم يبقى بلا تغير؛ لأن ضغط التحلل الخلوى يكون مستقلاً عن الحرارة ويمكنه إذن أن يدعم الجرم للأبد.

وليست المتقزمات البيضاء كلها بحجم واحد. فكلما كانت كتلة المتقزم الأبيض كبيرة، زاد الضغط والكثافة به من أجل مقاومة الجاذبية، وبالتالى قل حجمه. لكن لا يمكن لضغط التحلل الخلوى للإلكترونات أن يتحمل كتلة كبيرة بهذه الضخامة. لقد أوضح الفلكى الهندى سوبراهامانيان شاندرا ساخار، بدراسة تلك النجوم على المستوى النظرى، فى الثلاثينيات، أنها لن تقوى على مقاومة الانهيار إلا إذا كانت كتلتها أقل من (١,٤) مثل كتلة الشمس. ومع الأخذ فى الاعتبار بمقادير المادة المقتلعة على هيئة رياح نجمية، فإن ذلك يعنى أنه لا يمكن لنجم من التتابع الرئيس أن يبلغ درجة المتقزم الأبيض إلا إذا كانت كتلته أقل من نحو ثمانية أمثال كتلة الشمس. وسوف نرى لاحقًا ما يحدث بعد هذا الحد.

نجوم النوفا

ويمكن للمتقزمات البيضاء أن تولّد ظاهرة شديدة الإبهار، تدعى النوفا، إذا كانت تلك المتقزمات طرفا فى ثنائى نجمى. وتحدث هذه الظاهرة حين يصل النجم الثانى فى الثنائى إلى طور المتعملق الأحمر ويشهد تمدد غلافه.

فلو أن طرفى الثنائى قريبان من بعضهما البعض، فإن الطبقات الخارجية للمتعملق الأحمر تكون قريبة من المتقزم الأبيض بشكل كافٍ ليقوم باجتذابها. ويحدث انتقال للكتلة، حيث يأتى جزء من الهيدروجين فى العملاق الأحمر ليكون قرصا من المادة حول المتقزم الأبيض، وهو ما نطلق عليه القرص

التضخمى. بعد ذلك، وتحت تأثير قوى الاحتكاك الداخلية، يسقط غاز القرص شيئا فشيئا على المتقزم الأبيض، ويشكل طبقة من الهيدروجين ترتفع فيها الكثافة والحرارة بشكل متزايد.

وفى نهاية المطاف، حين تصل الحرارة لعشرة ملايين كلفين، تنطلق تفاعلات اندماج الهيدروجين. ويحدث انفجار مروع على سطح النجم، يعصف بطبقات الهيدروجين بعنف خارق. وتتضاعف إضاءة الثنائى النجمى فى عدة أيام بمُعامِل يتراوح بين عشرة آلاف ومليون وفقا لكمية الهيدروجين المتراكمة. ولا تعود الأوضاع لطبيعتها إلا بعد مرور شهور. وبرغم عنف الانفجار، لا يتأذى المتقزم الأبيض كثيرا، ويمكن أن يعود الهيدروجين للتراكم مرة أخرى إلى أن يحدث انفجار جديد بعد فترة تتراوح بين قرن وبضع عشرات الآلاف من السنين.

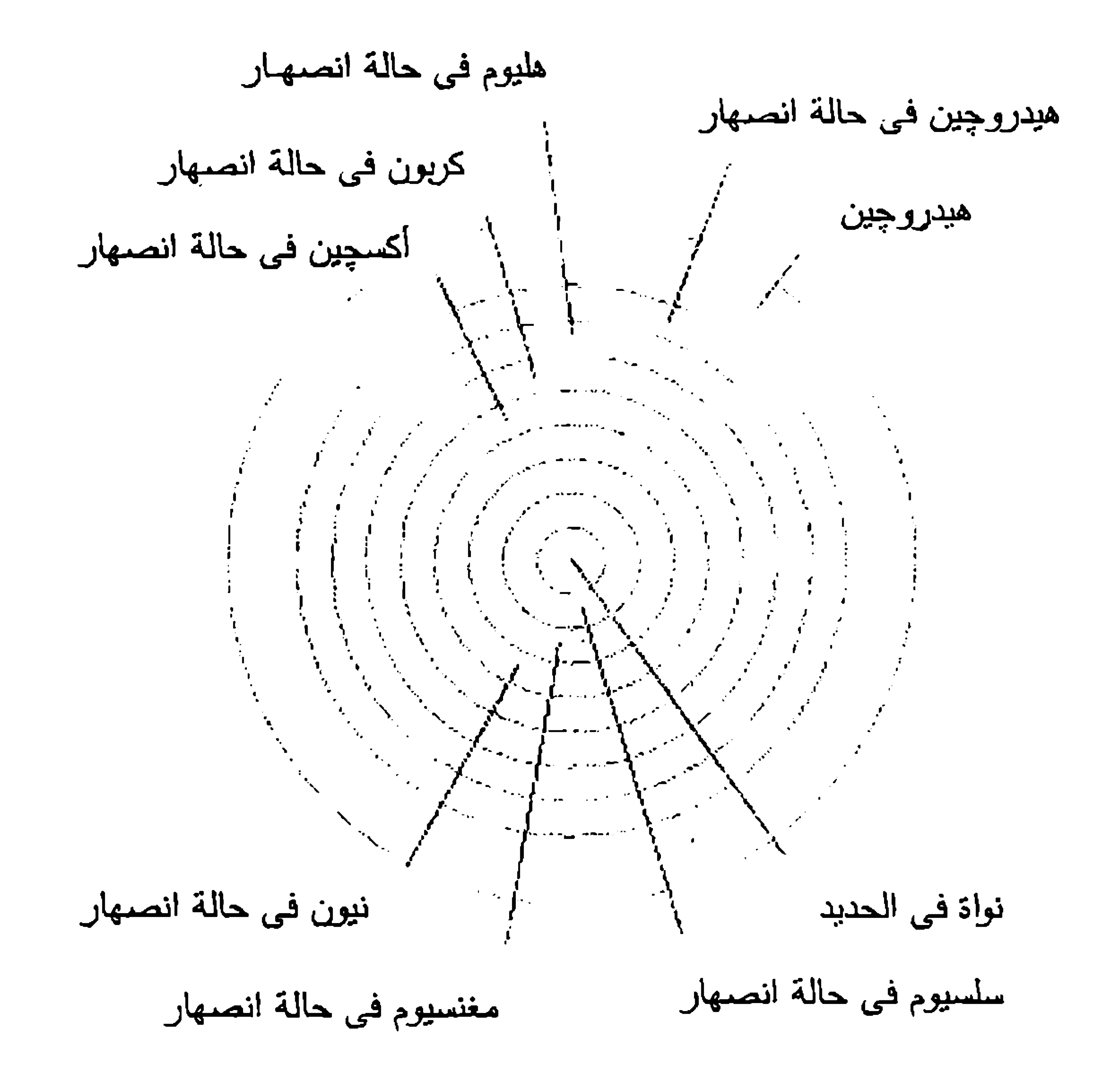
نهاية النجوم الكبيرة

تنتهى حياة النجوم التى تصل كتلتها لعدة أمثال كتلة الشمس عندما يتوقف اشتعال الهليوم، أى عند نفاد الوقود. وفى المقابل، فإن النجوم الأكبر كتلة تشهد نهاية أكثر تعقيدا لأنها تكون قادرة على إطلاق أنواع أخرى من التفاعلات النووية. فى الواقع، كلما كانت كتلة النجم مرتفعة، زاد وزن طبقاته الخارجية، وزاد انضغاط النواة به. وقد تصل بالتالى حرارة تلك النواة إلى مستويات أكبر، وهو ما يتيح اندلاع تفاعلات جديدة. على سبيل المثال، فإن نجما تزيد كتلته على أربعة أمثال كتلة الشمس سوف تزداد حرارة نواته حتى ستمائة مليون درجة، وهو الحد الذى يبدأ عنده اندماج الكربون.

لكن ذلك الطور الجديد من الاحتراق يستمر لوقت أقل من الطور السابق، ويكون على النجم أن يجد بشكل سريع مصدرا جديدا للطاقة. وتحدث، بهذا الشكل، سلسلة من التفاعلات النووية المختلفة، التى تتضمن مراحل متتابعة من عنصر لعنصر أثقل. وفى كل مرحلة، يفنَى المصدر الجديد للطاقة بشكل أسرع

من سابقه، ويتوقف الاحتراق بشكل مؤقت. ويؤدى ذلك لانكماش النواة وظهور قوقعة جديدة فى حالة انصهار، لينتهى الأمر باندلاع تفاعل جديد، وهلم جرًا.

ويتحدد عدد مراحل التفاعلات المختلفة وفقا لكتلة النجم. كلما كانت تلك الكتلة كبيرة، زادت حرارة مركز النجم، وزاد وزن النويات القابلة للانصهار. ونشير فى هذا السياق إلى النجوم التى تبلغ كتلتها عشرة أمثال كتلة الشمس، حيث تصل الحرارة فى جوفها بعد عدة مراحل من الاحتراق لمليار درجة وهى كافية لبدء انصهار الأكسجين، أو النجوم التى تزيد على عشرين مثل كتلة الشمس، والتى تصل لعدة مليارات درجة وتسمح بذلك للسلسيوم بالدخول فى العملية. ومع كل نوع جديد من التفاعل، تستمر أبعاد النجم فى التضخم، ويتحول النجم شيئا فشيئا لنجم فوق متعملق أحمر.



تكوين "قشرة البصل" لنجم ثقيل للغاية

لكن السلسلة لن تستمر مع ذلك إلى الأبد. فهى ستتوقف حينما يتشكل المركز بشكل أساسى من نويات (الحديد-٥٦). فى الواقع، إحدى خصائص أى نواة هى طاقة تلاحم كل عنصر من مكوناتها. وتمثل تلك الطاقة القوة التى يكون بها أحد عناصر النواة، سواء بروتون أو نيوترون، مرتبطا بأمثاله. فكلما زادت شدة طاقة الربط هذه زاد استقرار النواة. ويتصادف أنه من بين كل العناصر فإن (الحديد-٥٦) هو العنصر الذى يتسم بأكبر طاقة ربط لعنصر، إنها النواة الأكثر استقرارا فى الوجود، حيث لا مجال لأن تنصهر وتؤدى إلى توليد طاقة. لهذا السبب، يكون الحديد هو المرحلة الختامية للتفاعلات النووية. وهنا تكون نهاية السلسلة.

فى هذه المرحلة، يكون للنجم تكوين معقد للغاية، ففى المركز توجد نواة الحديد الخامدة. وتتعاقب بعد ذلك سلسلة الطبقات المنصهرة، والتى تضم كل منها أحد العناصر التى شاركت فى التاريخ النووى للنواة. إننا نجد بهذا الشكل، انطلاقا من الداخل، طبقات مُشكَّلة بشكل أساسى من السلسيوم والمغنسيوم والنيون والأكسجين والكربون والهليوم والهيدروجين. ولذلك يصف الفيزيائيون الفلكيون ذلك التكوين "بقشر البصل".

نجوم السوبرنوڤا

إذا لم تكن نواة الحديد قادرة على إنتاج طاقة عن طريق التفاعلات النووية، فلابد من وسيلة أخرى لتوليد الطاقة وذلك عن طريق الانكماش عبر تحويل طاقتها الجذبوية. إنه إذن انهيار جديد يبدأ لمجمل النجم. غير أن النجم سوف يتعرض، على نحو ما سنرى فيما بعد، لمجموعة من التفاعلات ستحول كل المادة الموجودة فى نواته إلى نيوترونات. وسوف تولِّد تلك الجزيئات موجة جديدة من ضغط التحلل الخلوى تؤدى فى نهاية المطاف إلى إيقاف انكماش النواة وجعلها شديدة الصلابة. لكن طبقات النجم الأخرى تستمر فى الانهيار، وتصل لسطح النواة غير القابل للانضغاط وتُسحق عليه بطريقة شديدة العنف

وترتد عنه. وتظهر حينذاك موجة تصادمية هائلة تتمدد للخارج وتكتسح كل شيء فى طريقها. وينتزع غلاف النجم بشكل كامل، وتقذف مادته نحو الوسط بين النجمى بسرعات تبلغ عدة آلاف كيلومتر فى الثانية. وبفعل كمية الطاقة الرهيبة الناجمة عن هذا الانفجار فإن النجم يأخذ فى اللمعان مثل مائتىْ مليون شمس، وأحيانا مثل مجرة كاملة. إنه مولد نجم السوبرنوفا.

نجم يلمع مثل مجرة بأكملها؛ ولن يمر مثل هذا الحدث بلا شك دون أن يُرى. فلو أن نجما سوبرنوفا انفجر بجوار الشمس فإن إضاءته ستكون شديدة، لدرجة أنه يمكن رؤيته فى صميم النهار. إن ذلك هو الحدث السماوى الأكثر إبهارًا للإنسان بعد مشهد عبور المذنبات. وتجدر الإشارة فى هذا السياق إلى أن تاريخ علم الفلك سجل عشرة انفجارات سوبرنوفا تاريخية تم رصدها ولا زال يتابع آثارها. يعود الأول منها لعام ١٨٥ فى التاريخ الصينى؛ حيث رصد الصينيون بشكل خاص فى عام ١٠٥٤ نجمًا سوبرنوفا فى كوكبة الثور، بقى مرئيا فى صميم النهار لمدة ثلاثة أسابيع. ويوجد الآن، فى المكان الذى يقولون إنه شهد الانفجار، سديم السرطان، وهو سحابة من الغاز والغبار موجودة على بعد ستة آلاف سنة ضوئية من الشمس، وتتكون من بقايا الغلاف الذى مزقه السوبرنوفا فى عام ١٠٥٤.

إن الدلائل الأقدم على وجود السوبرنوفا مدونة فى التاريخ الآسيوى. أما الأوروبيون فمن الوارد أن يكونوا قد رصدوا تلك الظواهر ذاتها؛ لكنهم كانوا يفضلون غض البصر عن مثل هذه الظواهر التى كانت تشكِّك فى نظرية أرسطو بشأن سكون السماء. وكان أول نجمين سوبرنوفا يتم الإعلان عن رصدهما رسميا فى الغرب هما سوبرنوفا تايكو براه فى عام ١٥٧٢، وسوبرنوفا كبلر عام ١٦٠٤. وقد لعبا دورا مهما فى تطور علم الفلك، لأنهما ظهرا فى حقبة كانت العقول بها أكثر تفتحا. وقد أظهرا لعلماء الفلك فى تلك الفترة أن السماء ليست ساكنة، وأن التمييز بين العالم تحت القمرى والأجرام السماوية لم يكن سوى فانتازيا خالصة. ومنذ تلك الحقبة، تم رصد نحو ألف سوبرنوفا.

نوعان من السوبرنوفا

جدير بالملاحظة أنه ليست كل السوبرنوفا تفسر بانهيار نجم كبير الكتلة؛ فبعض تلك التفجرات تندلع لأسباب مختلفة قليلا فى حالة الثنائيات النجمية، ومنها على سبيل المثال حالة الثنائى النجمى المكون من متقزم أبيض ونجم متعملق. حين يكون النجمان قريبين بشكلٍ كافٍ، يفقد المتعملق طبقاته الخارجية فتنتقل للمتقزم الأبيض وتخلق قرصا تضخميا حوله. ويقوم ذلك القرص بتغذية المتقزم شيئا فشيئا بالكتلة حتى يجعله يتجاوز حد شاندرا ساخار.

وفى وقت معين، لا يستطيع المتقزم مقاومة الجاذبية ويبدأ فى الانهيار. ويؤدى ذلك لاشتعال النجم، وبفعل الطبيعة الخاصة للمتقزمات البيضاء، فإنه يؤدى لانفجار وتفكك الجرم. وتكون النتيجة، فى نهاية المطاف، هى حدوث انفجار هائل، وزيادة إضاءة النجم بشكل هائل. وتكون تلك الظاهرة، برصدها من بعيد، مشابهة للغاية للظاهرة المصاحبة لانهيار نجم كبير الكتلة. وللتمييز بينهما، فسوف نستخدم مسمى سوبرنوفا من النوع (١)، فى مقابل سوبرنوفا من النوع (٢) الذى يكون ثمرة الانهيار الكلاسيكى.

التحليل النووى

تلعب النجوم كبيرة الكتلة دورًا أساسيًا فى التطور الكيميائى للكون. فى الواقع، وعلى نحو ما سنتبين لاحقًا، لم يكن الكون فى الأصل يتكون إلا من عنصرين كيميائيين؛ هما الهيدروجين والهليوم. ولو كان قد بقى على حالته لبقى هذان العنصران على هيئة مجرد سحابة لا أهمية لها ولما تطورت أى كيمياء، ولما تكون أى كوكب وما كانت الحياة قد نشأت أصلا.

وتحاول النجوم قليلة الكتلة مواجهة هذا الأمر بإنتاج عدة عناصر أثقل مثل الكربون والأكسجين، وإطلاقها إلى الفضاء عن طريق الرياح النجمية والسُدُم الكوكبية، غير أن تأثيرها يكون محدودا وذلك بسبب قلة العناصر الناجمة عن التفاعلات النووية وضآلة الكتلة التى تغذى هذه التفاعلات.

ويعود الدور الأكبر فى إيجاد العناصر الكيميائية إلى النجوم كبيرة الكتلة. وقد رأينا أن هذه النجوم على مدى حياتها تكون موضعًا لموجات متعاقبة من التفاعلات النووية متصاعدة التعقيد، وتقود إلى توليد كل العناصر الأخف من (الحديد-٥٦)، مثل السلسيوم والكبريت والنحاس. لكن تلك النجوم لا تكتفى بإنتاج العناصر الثقيلة، لكنها تعمل كذلك على توزيعها. وتفعل ذلك إبان الانفجار النهائى حين يتمزق الغلاف الغنى بالعناصر الجديدة، ويندفع نحو الفضاء بين النجمى. بهذا الشكل، تعمل النجوم الكبيرة، على مر الأجيال، على إثراء الكون بالعناصر الثقيلة، وتتيح له بذلك انبثاق كيمياء معقدة، الأمر الذى يفسح المجال لنشأة الحياة.

العناصر الثقيلة

ولا تقتصر النجوم الكبيرة على إنتاج العناصر الكيميائية الأخف من (الحديد-٥٦)، لكنها فى الواقع هى مصدر لكل العناصر التى نعرفها. وكنا قد أشرنا آنفًا إلى أن التفاعلات النووية لا تولِّد الطاقة فحسب؛ لكن أيضًا تؤدى إلى إنتاج جزيئات متعددة لاسيما النيوترونات. ولما كانت النيوترونات لا تحمل شحنة كهربية؛ فهى لا تتعرض للدفع الكهربى من جانب النويات الأخرى. ويمكن للنيوترونات إذن بسهولة أن تلتصق بنويات أخرى وأن تزيد من كتلتها. بعد ذلك، إذا لم يكن المنتج الجديد مستقرًا، فإنه يتحول وينتهى به المطاف إلى مولد عنصر كيميائى جديد. وبفضل تلك العملية التى تدعى القنص البطىء للنيوترونات، تنتج بعض العناصر الأثقل من الحديد مثل الذهب أو الرصاص على سبيل المثال.

ولا يتوقف الأمر عند ذلك الحد، فمن أجل تخليق العناصر الأثقل، ينبغى اللجوء لعمليات قنص سريع للنيوترونات. وتجرى عملية القنص هذه فى وقت تفجُّر السوبرنوفا. فحين تسحق الطبقات الداخلية للغلاف النجمى على النواة، فإنها تتعرض لدرجات حرارة وضغط هائلين. وتؤدى تلك الظروف إلى اندلاع العديد من التفاعلات النووية وإلى إنتاج نيوترونات بكميات كبيرة. وتتعرض النويات الثقيلة حينذاك لدفقات قوية من هذه الجزيئات. ولا بد لها من امتصاص

الكثير منها حتى تكون قادرة على التحول، ومن هنا يأتى ظهور عناصر أكثر ثقلاً من سابقتها على غرار اليورانيوم والبلوتونيوم.

النجوم النيوترونية

إن البقايا المركزية لانفجار سوبرنوفا غالبا ما تكون قد اكتسبت كتلة أكبر من حد شاندرا ساخار، وبالتالى لا يكون ثمة مجال لأن تفرز متقزما أبيض. ويتولد حينئذ نوع آخر من الأجرام هو النجم النيوترونى.

فى الواقع، فإن النجوم بالغة الثقل يكون السيناريو النهائى لها مختلفا عن السيناريو الذى يؤدى لنشأة المتقزمات البيضاء. إن الحد الأدنى للكتلة الأصلية لمثل هذه النجوم بالغة الثقل، ونعنى بالكتلة الأصلية الكتلة قبل فقْد المادة عن طريق الرياح النجمية، يقدر بثمانية أمثال كتلة الشمس. فى هذه الحالة، تكون طاقة الإلكترونات، إبان الانهيار، كافية لكى تندلع تفاعلات جديدة، تؤدى إلى اتحاد الإلكترونات والبروتونات لإنتاج النيوترونات. وسرعان ما تتحول مادة النجم، بشكل كامل، إلى نيوترونات. وفى الوقت نفسه، يقل عدد الإلكترونات سريعا، وهو ما يؤدى لانخفاض ضغط التحلل الخلوى. ولا يكون بالتالى هناك عقبة أمام الجاذبية، وينهار الجرم على ذاته.

وتتوقف العملية حين تبلغ المادة درجات من الكثافة مشابهة لكثافة النويات الذرية. وتظهر حينئذ قوة جديدة وهى ضغط التحلل الخلوى للنيوترونات، وهى قوة تكفى لتوفير الاستقرار للنجم. وتكون طبيعة ذلك الضغط مشابهة للضغط الذى تنتجه الإلكترونات. ويتجلى تأثير ذلك الضغط حين تكون النيوترونات تتضاغط فيما بينها، وتبدأ فى الاضطراب والتلاطم بشدة بفعل مبدأ عدم اليقين، وتكون أقوى بكثير من حالة الإلكترونات، وهو ما يفسر قدرتها على مقاومة جاذبية النجم ذى الكتلة الكبيرة.

إننا نكون حينذاك بصدد نوع جديد من الأجرام، الأصغر كثيرا فى الحجم والأكبر كثافة من المتقزم الأبيض، وهو النجم النيوترونى. وإذا كان القطر

المتوسط لمتقزم أبيض هو عشرة آلاف كيلومتر، فإن قطر النجم النيوتروني يكون نحو عدة عشرات من الكيلومترات. وبالمقارنة نجد أن ذلك القطر الأصغر بألف مرة، مع نفس الكتلة، يعنى أن تركيز المادة يكون أكبر بنحو مليار مرة. وتكون الكثافة المتوسطة لنجم نيوترونى، بهذا الشكل، أكبر بنحو مليون مليار مرة من كثافة المياه، ويكون السنتيمتر المكعب من مادته ذا كتلة تقارب مليار طن.

ومع تلك الكثافة الخيالية، لا يكون للمادة أى صلة بما يمكننا رصده على الأرض. ومع ذلك من الممكن اللجوء للفيزياء النظرية لدراسة النجوم النيوترونية. ولقد أمكن بهذا الشكل تحديد التكوين الداخلى لمثل تلك الأجرام. فبالغوص نحو قلب النجم، نقابل أولاً قشرة بللورية تتكون من نويات ذرية، وبشكل خاص نويات (الحديد-٥٦). بعد ذلك تأتى النيوترونات والبروتونات فى الحالة الحرة، أولاً على هيئة سائلة، ثم على عمق أكبر فى الحالة الصلبة. وتظهر فى النهاية النواة، التى لا يكون فيها وجود للبروتونات أو النيوترونات، حيث تكون قد تحولت إلى مكوِّناتها الأوَّلية وهى الكواركات. إن كل ذلك بدون شك تفسير نظرى بحت وسيبقى كذلك لوقت طويل.

نجوم البلسار النابضة

بدأ التكهن النظرى بوجود النجوم النيوترونية منذ عام ١٩٣٣، عن طريق الألمانى والتر باد والسويسرى فريتز زويكى، ولم تؤخذ بمأخذ الجد إلا بعد ذلك بثلاثين عامًا، بعد اكتشاف نجوم البلسار.

لقد تم اكتشاف وجود نجوم البلسار، فى عام ١٩٦٧، عن طريق الفلكيين الفيزيائيين الإنجليزيين جوسلين بيل وأنطونى ويش. كان هذان الباحثان يدرسان تأثير الوسط بين الكوكبى على انتشار موجات الراديو، واكتشفا بالصدفة مصدرًا يُدعى (PSR 1919+21) يبث نبضات راديو بشكل منتظم للغاية. وسرعان ما اكتشف علماء آخرون فى مجال الفلك الراديوى وجود عدد كبير جدا من مثل

هذه المصادر. وكانت تلك المصادر تتسم كلها بنبضات سريعة للغاية، تتراوح مدة دورتها بين عدة ثوانٍ وأجزاء من الألف من الثانية، وكانت تتميز بوجه خاص بانتظام واستقرار فائقين بدرجة دقة نسبية تصل لجزء من الألف من المليار، ونحن نعرف اليوم عدة مئات من تلك المصادر.

طبيعة نجوم البلسار

منذ اكتشاف نجوم البلسار، كان السؤال المطروح يدور حول ماهية طبيعتها. إن مسألة تخيل جسم أو ظاهرة من شأنها توليد إشارات دورية بمثل هذه السرعة والدقة، أثارت حيرة العلماء وبعد استبعاد احتمال أن تكون هذه الإشارات واردة من حضارة أخرى فى كوكب آخر أو أن تكون مجرد حالات تشويش إذاعى، كان الحل الأكثر قبولا هو وجود جسم يدور بسرعة شديدة؛ فإذا كان هذا الجسم يبث إشعاعه فى حُزْمة ضيقة، فإن الوضع يمكن مقارنته بطريقة أداء الفنار؛ الأمر الذى يفسر النبضات بالمرور الدورى للحزمة الضوئية باتجاه الأرض.

وليس لسرعة الدوران من تفسير إلا أن تكون النبضات صادرة من أجسام صغيرة للغاية. فى الواقع، لو أن نجمًا عاديًا يدور بمثل هذه السرعة لكان قد تفتت سريعا تحت تأثير قوة الطرد المركزى. ولقد كانت النجوم النيوترونية، التى افترض العلماء قبل وقت طويل وجودها بشكل نظرى بحت، تبدو المرشح الأمثل لذلك البث. وسرعان ما تم إثبات ذلك، فى عام ١٩٦٨، باكتشاف نجم بلسار فى قلب سديم السرطان، وهو ما أكد بشكل جلى العلاقة بين بقايا السوبرنوفا ونجوم البلسار. وفى الوقت الحالى لم يعد هناك شك حول الربط بين هوية الاثنين؛ حيث تطور فهمنا لآليات الانبعاثات بشكل كبير.

إن الحجم الصغير للنجوم النيوترونية هو الذى يسبب ظاهرة نجوم البلسار. فهو يفسر، فى آنٍ واحد، سرعة الدوران المرتفعة ووجود مجال مغناطيسى وكهربى كثيف، وهى العوامل التى تدخل فى بث الراديو السريع والمستقر الذى يميز نجوم البلسار.

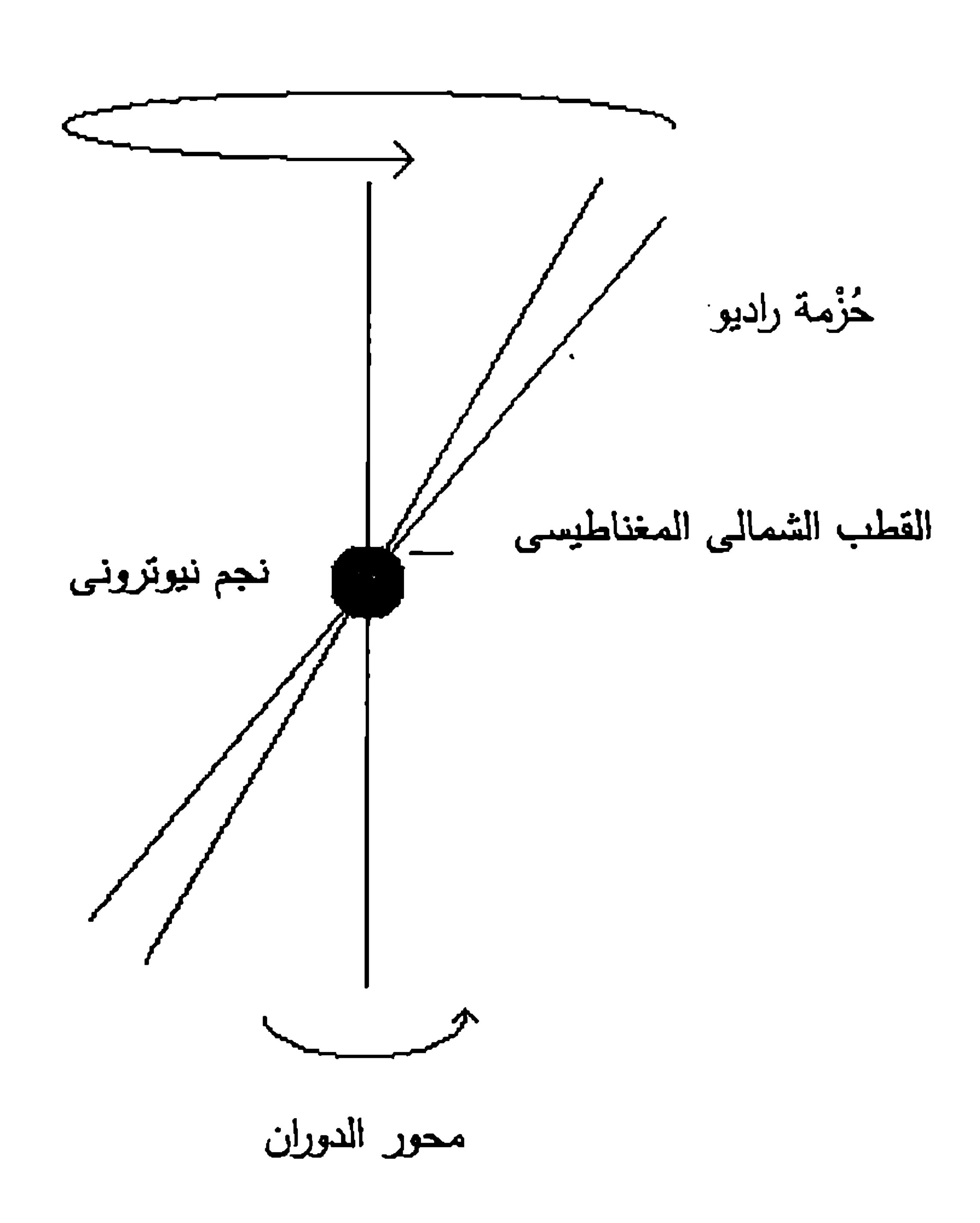
والسمة الأولى المترتبة على صغر حجم النجم هى سرعة دورانه الهائلة. وثمة مقياس يدعى العزم الزاوى يتحكم فى دوران جسم ما، ويتم حسابه عبر كتلة وحجم الجرم المعنى وسرعة دورانه. والخاصية الأساسية للعزم الزاوى هى ثبات مقدارها بالنسبة للجسم المعزول. وتنطبق هذه الخاصية على وجه التحديد على حالة جرم ينهار ويصبح نجما نيوترونيا. ينبغى إذن التأكد من أن مقدار العزم الزاوى محفوظ خلال العملية. ولما كانت كتلة النجم تظل ثابتة بينما يقل حجمه بشدة، ويتحول من عدة ملايين لعدة عشرات من الكيلومترات، فلابد لتعويض ذلك من أن تتضاعف سرعة الدوران بنسبة تعادل نسبة تناقص الحجم. إنه نفس المبدأ الذى يجعل لاعبة تزلق تدور حول نفسها تزيد من سرعة دورانها حين تضع أذرعها بامتداد جسدها. إذن، الحجم الصغير للنجوم النيوترونية هو سبب سرعة الدوران الشديدة والتى يمكن أن تصل لعدة دورات فى الثانية.

والحجم الصغير للنجم يرجع إليه كذلك وجود مجال مغناطيسى وكهربى شديد القوة. فعلى غرار العزم الزاوى، ينبغى أن تكون شدة دفق المجال المغناطيسى ثابتة. ولما كان هذا المعيار يساوى حاصل ضرب شدة المجال فى مساحة سطح الجرم، وحيث أن السطح يتضاءل كثيرا مع الانهيار فلابد لشدة المجال المغناطيسى أن تزداد بشدة. ويفسر ذلك الوصول لمستويات هائلة من الكثافة، تُقدر بألف مليار مثل كثافة المجال الأرضى. فى نهاية المطاف، يؤدى تضافر تأثير الدوران السريع والمجال المغناطيسى القوى إلى تولُّد مجال كهربى بالغ الشدة مثل حالة المولِّد الكهربائى.

الأشعة السنكروترونية

يؤدى التداخل بين كل تلك العوامل إلى مولد نجم البلسار. فمن شأن المجال الكهربى القوى، أن يعمل بشكل قوى على تعجيل الإلكترونات القريبة من الأقطاب المغناطيسية، وبالتالى فهى تنتقل بسرعة كبيرة بطول خطوط حلزونية تلتف حول المجال المغناطيسى وتبث أشعة سنكروترونية، وهو نوع معروف من موجات الراديو، ونجده فى بعض أجهزة تعجيل الجزيئات.

وتكون حزمة الأشعة السنكروترونية ضيقة للغاية، بحيث يتطابق اتجاهها مع اتجاه محور القطبين المغناطيسيين، ولما كان هذا الأخير على غير استقامة مع محور الدوران، تماما مثل القطب الشمالى المغناطيسى الأرضى الذى لا يتطابق مع القطب الشمالى الجغرافى، فإن ذلك يفسر السبب فى أنه حين يدور الكوكب حول محوره لا تكون الحزمة ساكنة، وإنما تمسح جزءا من السماء فى شكل مخروط. وإذا كانت الأرض موجودة بالصدفة فى المنطقة التى يمسحها، فإنها تتلقى دفقة محدودة للغاية من موجات الراديو، فى كل مرة تجتاز فيها الحزمة، وذلك هو أصل ظاهرة نجوم البلسار.



النجم البلسار: حزمتان ضيقتان فى موجات الراديو يبعث بهما قطبا النجم النيوترونى المغناطيسيان. وتحت تأثير دوران ذلك النجم تمسح الحزمتان منطقتين ممدودتين فى السماء. وإذا تواجدت الأرض بالمصادفة فى المنطقة التى تمسحها الموجات الراديوية، فإنها تستقبل فى كل دورة نفحة من موجات الراديو.

إن أحد نتائج طبيعة هذه العملية هو أننا لا نستطيع أن نرصد سوى نسبة محدودة من العدد الإجمالى لنجوم البلسار؛ حيث أن اتجاه الحزمة، فى الواقع، يكون عشوائيا بشكل أو بآخر، ومن ثَم لا يكون للأرض سوى فرص محدودة للغاية لأن يتصادف وجودها فى المنطقة التى يتم مسحها بأحد نجوم البلسار. فضلا عن ذلك، فإن موجات الراديو تضعف ومن ثم لا يسعنا إلا أن نرصد الأجرام الأقرب. ولذلك فمقابل مئات النجوم البلسار التى تم رصدها، من الوارد أن يكون هناك مئات الملايين منها فى كل المجرة.

جدير بالذكر أيضا أنه حتى لو كان إشعاع النجم البلسار شديد الاستقرار، فإنه يتغير بشكل طفيف مع مرور الوقت. ففى الواقع، يقتضى بث إشعاع ما وجود مصدر للطاقة. وبالنسبة لنجوم البلسار، فإن دوران النجم النيوترونى هو الذى يمثل ذلك المصدر. لكن بما أن هناك فَقْدًا للطاقة بسبب الإشعاع، فلا مفر من أن تتضاءل سرعة الدوران ولكن ببطء. وهو ما نلمسه بالفعل. وتقل سرعة دوران البلسار بالفعل بنسبة تبلغ فى المتوسط نحو جزء من مليون فى العام. وفى حالة نجوم البلسار الشابة، على غرار بلسار السرطان، فإن التغير يكون قويا ويبلغ نحو جزء من المليون فى اليوم.

ومن وقت لآخر، يختل معدل ذلك التطور البطىء مع تغيرات مفاجئة فى مدة الدورة النبضية. وتُعزى تلك التغيرات إلى تعرض النجم النيوترونى لتقلبات فى تركيبه وإعادة ترتيب طبقاته الداخلية. ففى الحقيقة، ووفقًا لقاعدة ثبات العزم الزاوى، فإن أى تغير طفيف فى الحجم أو توزيع المادة يكون مصحوبًا باضطراب الدوران.

أشعة إكس

تم اكتشاف إحدى السمات المهمة لحياة النجوم النيوترونية حينما جرت عمليات الرصد الأولى للسماء فى نطاق أشعة إكس. ولما كان الغلاف الجوى الأرضى غير مُنْفذ لتلك الأشعة، فكان ينبغى تجاوزه. وبدأ الأمر فى الستينيات

بإرسال المراقب فى مناطيد أو صواريخ، لدراسة السماء. غير أن ذلك الأسلوب لم يكن مجديا لقصر زمن الرصد. بعد ذلك، فى عام ١٩٧٠، كان (أوهورو)، القمر الصناعى الأول للرصد فى نطاق أشعة إكس، هو الذى كشف النقاب عن أكثر من مائة من مصادر الإشعاع شديدة القوة. ومنذ ذلك الوقت، منحتنا العديد من الأقمار الصناعية الأخرى، المختصة بدراسة نطاق أشعة إكس، رؤية أكثر عمقًا، ونخص بالذكر أرصاد الأقمار (أينشتاين) فى عام ١٩٧٨، و(روزات) فى عام ١٩٩٠، وكذلك (شاندرا) و(إكس إم إم نيوتن)، اللذين تم إطلاقهما فى عام ١٩٩٩.

إن أغلبية مصادر أشعة إكس هى نجوم ثنائية شهدت العمليات التى سبق ذكرها من انتقال الكتلة ونشأة قرص تضخمى. غير أنه فى مثل هذه الحالة، بدلا من المتقزم الأبيض، فإن كل شىء يحدث حول النجم النيوترونى. وبسبب قوة الجاذبية الهائلة تكون المادة المتراكمة شديدة الكثافة، وحرارتها مرتفعة إلى أقصى حد. ووفقًا لقانون وين، فإنها تبث إشعاعًا حراريًا ذا طول موجى شديد القصر فى مجال أشعة إكس، وهو ما يفسر الأرصاد المشار إليها آنفًا.

ويكون ذلك البث، فى معظم الوقت، متواصلا دون تغيرات مباغتة. لكن بعض مصادر أشعة إكس تبث إشعاعاتها بشكل ترددى طول دورتها بضع ثوانٍ. وفى هذه الحالة، يكون الغاز الذى يسقط على النجم النيوترونى خاضعا لتأثير المجال المغناطيسى، فيتحرك نحو القطبين. ويكون اصطدام الغاز فى تلك النقاط عنيفا إلى أقصى حد بحيث يؤدى إلى انبعاث إشعاع شديد القوة. ومثلما هو الحال بالنسبة للبث الراديوى لنجوم البلسار، فإن ذلك الإشعاع يكون محصورا فى حزمة ضيقة، تطوف بشكل دورى فى السماء. وإذا تصادف وجود الأرض فى مسار تلك الحزمة، فإنها سوف ترصد بشكل دورى دفقة من الإشعاع، ومن هنا جاء تسميتها بنجوم البلسار المنتجة لأشعة إكس.

ويمكن أيضا أن تحدث ظاهرة مشابهة للنوفا. وهذا هو ما يحدث، فى حالة عدم تأثر مادة القرص التضخمى بالمجال المغناطيسى، وتكون النتيجة أن تتوزع هذه المادة على كل سطح النجم. وبسبب الظروف القصوى التى تسود

النجم، فإن التفاعلات النووية لانصهار الهيدروجين وتحوله إلى الهليوم تحدث بشكل مستمر. وتنشأ أيضا دون أحداث عنيفة طبقة من الهليوم على سطح النجم. وفى نهاية المطاف، حين تكون الحرارة والكثافة كافيين، يبدأ اشتعال الهليوم، ويحدث انفجار مروِّع. وتتولد عن ذلك الانفجار كمية هائلة من الإشعاع توصف بدفقات أشعة إكس. وتكون الظاهرة أسرع مما هو الحال بالنسبة لنجوم النوفا. غير أن الأحداث برمتها لا تستغرق إلا ثوانى معدودة: انفجار ثم عودة للوضع العادى.

رشقات أشعة جاما

تُعد رشقات أشعة جاما واحدة من آخر الألغاز الكبرى بالفيزياء الفلكية المعاصرة. وعلى الرغم من أن وجود تلك الانبعاثات معروف منذ الستينيات، غير أن طبيعتها لا زالت غير معروفة، بسبب نقص المعطيات الرصدية فى المقام الأول. وللتدليل على ذلك يكفى القول بأنه حتى عشرة أعوام فقط لم يكن الفيزيائيون الفلكيون يعرفون بعد ما إذا كان مصدر رشقات أشعة جاما هذه موجودا فى المجموعة الشمسية أم فى درب التبانة أم فى مجرات بعيدة.

إن تلك الرشقات هى مجرد انبعاثات قصيرة بمدة تتراوح بين أجزاء من ألف من الثانية وعدة دقائق. فلنتذكر أن أشعة جاما هى فى الحقيقة فوتونات مشحونة بالطاقة بشدة، وتنتج على سبيل المثال على الأرض نتيجة التفاعلات النووية. وإذا كان من الممكن مراقبة السماء بأسرها بشكل مستمر، لرصدنا على الأقل رشقة جاما كل يوم قادمة من اتجاه عشوائى من القبة السماوية.

والخاصية الملفتة للانتباه فى هذه الظاهرة هى كَمُّ الطاقة التى تنطوى عليها. إذا كان مصدر رشقات أشعة جاما هو المجرات البعيدة، وهو ما ثبت بالنسبة لبعضها، فلابد أن الطاقة التى يبثها مصدرها مقدارها خيالى خارق أكبر مئات المرات من مثيلتها فى حالة نجوم السوبرنوفا. وتفسر تلك الطاقة غير الاعتيادية مدى اهتمام الوسط العلمى بهذه الظاهرة، بما أنها قد تكشف عن

عمليات جديدة تتعلق بالنجوم النيوترونية أو الثقوب السوداء أو نجوم الهيبرنوفا، بل وربما عن ظواهر فيزيائية جديدة غير معروفة حتى الآن.

لقد تم اكتشاف رشقات أشعة جاما بالصدفة فى عام ١٩٦٧، بواسطة الأقمار الصناعية التى كانت أمريكا قد وضعتها فى مدارات حول الأرض لمراقبة تطبيق معاهدة منع انتشار الأسلحة النووية من قِبل الاتحاد السوفيتى. ولم تكشف هذه الأقمار، على هذا الصعيد، أى خرق للمعاهدة، لكنها رصدت بدلاً من ذلك انبعاثات مشتتة مجهولة المصدر لأشعة جاما قصيرة المدة. وسرعان ما اتضح أن تلك الانبعاثات تأتى من الفضاء وليس من الأرض، لكن أدوات الرصد فى تلك الفترة لم تكن متطورة بالدرجة التى تتيح لها قياس اتجاهها الأصلى بشكل دقيق. وأدى هذا القصور إلى طرح نظريات عديدة متنوعة، ترجع مصدر هذه الرشقات على سبيل المثال للنجوم النيوترونية بدرب التبانة أو لسحابة أورت التى تحيط بالمجموعة الشمسية أو لمصادر فى المجرات البعيدة.

نبذة تاريخية

وجاءت بشائر التقدم العلمى من خلال عمليات رصد فى نطاق أشعة إكس كان يجريها، فى بداية التسعينيات، القمر الصناعى الأمريكى (كمبتون). فقد كان هذا القمر مزودًا بأداة تدعى (باتسى) (BATSE) قادرة على مراقبة جزء كبير من السماء فى وقت واحد، وتوفير قياس دقيق لاتجاه أى حدث طارئ، الأمر الذى أتاح لمرصد (كمبتون) رصد مئات من رشقات أشعة جاما، وأن يبين أن مصدرها موزع بشكل عشوائى فى كل القبة السماوية. ولو أن هذه الرشقات كانت واردة بشكل أساسى من داخل مجرتنا، لما أصبحت موزعة بشكل منتظم فى السماء، ولأصبحت متركزة فى نفس الشريط الضيق لدرب التبانة. وبالتالى أطاح ذلك التفسير بالتفسير المرجح فى تلك الفترة، الذى كان يُعزى هذه الرشقات إلى ظواهر تحدث على سطح النجوم النيوترونية بداخل المجرة.

وفى نهاية التسعينيات، حدث تطور آخر حاسم حين ظهر أن رشقات أشعة جاما يمكن أن يعقبها انبعاث ضوئى فى أطوال موجية أخرى، وهى الظاهرة التى تدعى الملحق الضوئى. لقد تم ذلك الكشف عام ١٩٩٧ بواسطة القمر الصناعى الإيطالى (بيبوساكس) إبان رصد حالة رشق لأشعة جاما (٩٧٠٢٢٨) فى نطاق أشعة إكس. كان الأمر يتعلق بقفزة أساسية لأنها فتحت الطريق للرصد بأدوات جديدة، وبوجه خاص عن طريق التحليل الطيفى. وسرعان ما استُخدمت تلك التقنية للإسهام فى قياس الإزاحة الحمراء للملحق الضوئى، والذى كشف أن المصدر لا بد وأن يكون موجودًا فى مجرة تبعد مليارات السنين الضوئية.

وبرصد الانبعاث نفسه بمرقب (ويليام هرشل)، كشف فريق آخر وجود ملحق ضوئى فى المجال المرئى. ولقد فتحت هذه الخاصية الجديدة المجال للمَرَاقب الأرضية الكبرى وللمراقب الفضائية، بدءًا من ذلك الوقت، للانضمام والمشاركة فى دراسة هذا النوع من الانبعاثات، وبشكل خاص فى البحث عن المجرات التى تحوى هذه المصادر.

منبع رشقات أشعة جاما

ولقد أتاحت نتائج عمليات رصد أشعة جاما (٩٧٠٢٢٨) وغيرها من نتائج العمليات التالية، استبعاد النظريات التى تعتبر أن مصدر ذلك الانبعاث هو سحابة أورت أو أجرام داخل المجرة. ولم تعُد الطبيعة الكونية لرشقات أشعة جاما الأطول محل شك بفضل رصد إزاحتها نحو اللون الأحمر (وإن بقى الشك بالنسبة للموجات الأقصر التى لم يكن فى الإمكان قط قياسها). ويواجه الفيزيائيون الفلكيون الآن مهمة تفسير الظاهرة الأكثر قوة فى الكون والقادرة على بث كَمّ من طاقة أكبر مئات المرات من الطاقة النابعة من انفجار سويرنوفا.

وثمة نظريتان تسودان فى الوقت الحالى. تقول الأولى، بأن مصدر الانبعاثات قد يكون ثنائيا نجميا نيوترونيا يدور طرفاه حول بعضهما البعض. وتُظهر نظرية النسبية أنه فى مثل تلك الوضعية يفقد النجمان الطاقة بشكل

سريع على هيئة موجات جذبوية. ويؤدى انخفاض طاقة الثنائى، مع الوقت، لتناقص المسافة بين طرفيه، وينتهى المشهد حين يصطدم الجرمان فينصهران معًا أو يولدان ثقبا أسود. وتنتج تلك الظاهرة طاقة هائلة قد تفسر انبعاثات جاما.

ويستند التفسير الآخر إلى مفهوم الهيبرنوفا، وهى حالة قصوى من السوبرنوفا قد تحدث إبان انفجار النجوم الأكبر كتلة والتى تصل لنحو أربعين مثل كتلة الشمس. وجدير بالذكر أن النجوم كبيرة الكتلة ينتهى وجودها بانهيار جذبوى يؤدى إلى تكون نجم نيوترونى أو ثقب أسود. وتتولد عن ظهور تلك البقايا المركزية موجات تصادمية تؤدى إلى تفجر الباقى من النجم وقذف طبقاته الخارجية بعنف.

ولتفسير انبعاثات جاما، طرح الفيزيائيون الفلكيون بالتالى فرضية أنه فى قلب النجوم الأكبر كتلة تكون القوة الجذبوية شديدة؛ لدرجة تحول دون طرد الطبقات الخارجية من الغاز للخارج لكن تحتجزها البقايا المركزية. وتؤدى تلك العملية لزيادة ضخمة فى كم الطاقة الجذبوية المحولة لإشعاع وحرارة إبان الانهيار النهائى، الأمر الذى قد يفسر قدرة ذلك الحدث على تحرير طاقة أكثر كثيرا من الطاقة التى يحررها سوبرنوفا كلاسيكى. غير أنه ينبغى أن نعى أن وجود نجوم الهيبرنوفا هو أمر لا زال افتراضيًا للغاية، على عكس السوبرنوفا المعروفة من وقت طويل.

القمر الصناعى سويفت

إن معرفتنا عن انبعاثات أشعة جاما ومصادرها ستشهد قريبا طفرة بفضل القمر الصناعى الأمريكى (سويفت)، الذى تم إطلاقه فى نوفمبر عام ٢٠٠٤. يحمل هذا القمر معه ثلاث أدوات؛ هى (بى أيه تى: بات) (BAT) وهو جهاز يمكنه ضبط أشعة جاما وبوسعه مراقبة سدس مساحة السماء فى آنٍ واحد، وجهاز (إكس آر تى) (XRT) مسبار أشعة إكس، وجهاز (يوفوت) (UVOT) وهو تلسكوب يقوم بالرصد فى نطاق الأشعة فوق البنفسجية والمجال المرئى.

وتكمن خصوصية ذلك القمر الصناعى فى قدرته على تغيير اتجاهاته بشكل سريع للغاية ويرتبط ذلك بمعنى كلمة سويفت SWIFT فى اللغة الإنجليزية، حيث يمكنه، فور الكشف عن انبعاث جاما بواسطة الجهاز (بات)، الاستدارة نحو المصدر المعنىّ بشكل دقيق فى بضع عشرات من الثوانى فحسب. الأمر الذى يتيح للجهازين الآخرين (اللذين يقل مجال الرؤية فيهما عن مثيله فى "بات") المساهمة فى دراسة الانبعاث وملحقه الضوئى. وفى الوقت ذاته، سيتم نقل كل المعطيات التى جمعها (سويفت) بشكل سريع للأرض، حيث يمكن سريعًا توجيه المَرَاقب الأرضية للإسهام فى مراقبة الحدث ومتابعته.

ولما كان حساس (أداة رصد) أشعة جاما فى القمر (سويفت) يتسم بأنه أكثر حساسية بخمس مرات من مثيله فى (كمبتون)، فمن المتوقع أن تتم بواسطته دراسة نحو ألف من مثل هذه الرشقات الإشعاعية على مدى السنوات الثلاث لبعثته. وسوف تؤدى المشاركة بين الأدوات الثلاث التى تعمل فى أطوال موجية مختلفة إلى الحصول على معلومات دقيقة حول مواضع الانبعاثات وخصائصها الطيفية والتطور الزمنى للانبعاث الرئيس والملحق الضوئى له. وقد تساعدنا تلك المعطيات فى فهم أفضل لمصدر انبعاثات أشعة جاما وتطورها وتفاعلها مع الوسط المحيط بها.

[٧]

النسبية والثقوب السوداء

ملاحقة المكان المطلق

قبل متابعة دراسة مختلف حالات الموت النجمى واستكمالها بتناول حالة الثقوب السوداء، فلنتعرف أولاً على النظرية التى تصف تلك الأجرام الغريبة وهى نظرية النسبية.

كان المفهوم الذى يعتنقه الفيزيائيون للمكان والزمان، حتى نهاية ذلك القرن، هو بشكل أو بآخر مفهوم إسحق نيوتن، ومؤداه أن المكان مطلق وصلب وساكن ويملأ الكون، ويمثل إطارًا مرجعيًا تنسب إليه الحركة والسكون بشكل مطلق، وأن هناك كذلك زمنا مطلقا وكونيا يمضى بطريقة منتظمة ومستقلة عن أى تأثير خارجى. وقد استطاع نيوتن، مع تلك المفاهيم للمكان والزمان المطلقين، المتماثلين بالنسبة لكل الراصدين، وضع القوانين التى أوجزناها فى الفصل الأول والتى نشأ معها العلم الحديث.

ومع التقدم فى فهم الكهرومغناطيسية، ظهر بعد ذلك مفهوم آخر مرتبط بالمفاهيم السابقة: إنه الأثير، وهو بشكل ما وسط غير مادى كان من المعتقد أنه يشكل وسيطًا مساعدًا على انتشار الموجات الضوئية، وهو فى حالة سكون فى المكان المطلق. وكانت المسألة التى تهم الفيزيائيين فى ذلك الحين هى

معرفة ما إذا كانت الأرض مستقرة أم فى حالة حركة بالنسبة للأثير وبالنسبة للمكان المطلق.

الزَّيْغ

وجاءت الإجابة الأولى عن طريق رصد ظاهرة تدعى الزيغ. ففى الواقع، يبدو كل نجم، برصده من الأرض، أنه يتحرك كل سنة فى مدار بيضوىّ صغير فى السماء، وذلك بشكل مستقل عن ظاهرة اختلاف الرؤية. وقام بتفسير ذلك التغير، فى عام ١٧٢٩، عالم الفلك الإنجليزى چيمس برادلى حيث أعزاه لحركة الأرض فى مدارها، مع حقيقة أن سرعة الضوء محدودة. ويمكن مقارنة ذلك بظاهرة مماثلة تنشأ حين نتحرك تحت المطر؛ فإذا لم تكن هناك رياح، ستسقط الأمطار بشكل عمودى؛ وذلك هو ما نلمسه لو بقينا ثابتين. لكن الأمر لا يكون كذلك لو كنا نعدو. فعلى الرغم من أن الأمطار تستمر فى السقوط بشكل عمودى، فإن السرعة سوف تمنحنا الانطباع بأن المطر يسقط بشكل مائل، وهو تأثير يزداد وضوحا كلما زادت سرعة حركتنا.

والظاهرة مماثلة بالنسبة للأرض. فبفعل سرعة حركة كوكبنا حول الشمس، فإن الاتجاه الظاهرى للأشعة الضوئية يشوبه اضطراب طفيف. وبما أن دوران الأرض حركة دورية، فإن تلك التغيرات تكون هى الأخرى دورية. بهذا الشكل، فإن الوضع الظاهرى لنجم ما، والذى يرتبط باتجاه انتشار الضوء، يتحرك فى مدار بيضوىّ على مدى العام. يستند ذلك التفسير بوضوح على فرضية أن الأرض تتحرك. وكان واقع رصد ظاهرة الزيغ، بالنسبة للفيزيائيين فى القرن الماضى، يؤكد بالتالى أن الأرض لا بد أن تكون فى حالة حركة بالنسبة للأثير، الذى يفترض أنه أداة انتشار الموجات الضوئية.

تجربة مايكلسون

وكانت الخطوة التالية، بعد إثبات تلك النقطة، تتمثل فى قياس سرعة الأرض بالنسبة للأثير. وجاءت المساهمة الكبرى فى تلك العملية على يد الفيزيائى الأمريكى ألبرت مايكلسون، الذى ابتكر أداة لتنفيذ ذلك القياس. كان

ذلك الجهاز الذى يُسمى (المدخال) يتكون من مصدر للضوء ومجموعة من المرايا مثبتة بزاوية معينة، وكانت فكرة عمل الجهاز كالتالى: شعاع ضوئى ذو تردد معين يدخل فى الجهاز وينقسم لاثنين. والحُزَم الضوئية المنعكسة من المرايا فى اتجاهين متعامدين قبل أن تنعكس مرة أخرى وتنضم فى النهاية فى شعاع واحد. كان تحليل ذلك الشعاع الأخير يُظْهر كيف كان مسلك الحزمتين حين كانتا منفصلتين. وأثبت المدخال بهذا الشكل إمكان وجود اختلاف ممكن بين انتشار الضوء فى الاتجاهين المتعامدين. بالتالى لو أن الأرض كانت فى حالة حركة بالنسبة للأثير، فإن اتجاه الانتشار المتوازى مع تلك الحركة هو الأوْلَى بالمصداقية. وكان لا بد لمسلك حزمتَى الضوء أن يختلف، وفقًا لجهاز مايكلسون.

وتمت التجربة فى عام ١٨٨٧، وأظهرت أن التأثير المنتظر لم يحدث. وهذا يعنى أنه لو كان هناك ما يُسمى بالأثير، فلابد للأرض أن تكون مستقرة به، وهو بالتحديد عكس ما كانت ظاهرة الزيغ تظهره. مفهوم الأثير وصل بالتالى لطريق مسدود. فليس من الممكن أن تكون الأرض فى حالة حركة وفى حالة استقرار بالنسبة للأثير فى آنٍ واحد. وكان الاستنتاج الوحيد الممكن هو أن الأثير والمكان المطلق لا وجود لهما، وهو ما كان يعنى بالتالى أنه ينبغى إعادة النظر فى الفيزياء النيوتونية، بما أنها كانت تستند لفرضية وجود مثل ذلك المكان المطلق.

وتمت العديد من المحاولات لمراجعة الفيزياء بعد تجربة مايكلسون، لكنها لم تكن تذهب بعيدًا فى تغيير المفاهيم الأساسية. واستمر الحال على ما هو عليه حتى جاء ألبرت أينشتاين، الفيزيائى الألمانى الشاب، وطرح رؤية جديدة تماما. حدث ذلك على مرحلتين. قدم أينشتاين فى البداية، فى عام ١٩٠٥، عمله الأول وهو نظرية النسبية الخاصة التى كانت بمثابة ثورة لمفاهيم الإنسان للمكان والزمان، وكشفت علاقة التبعية بين المفهومين، واستبعدت فكرة "المطلق" فيما يتعلق بهذين المفهومين. بعد ذلك، فى عام ١٩١٥، نشر أينشتاين نظرية النسبية العامة التى جاءت مكملة للنظرية السابقة بإدخال

عاملَى العجلة والجاذبية فى الحسبان، والتى عمَّقت هُوَّة التشكيك فى فيزياء نيوتن.

النسبية الخاصة

وضع ألبرت أينشتاين نظرية النسبية الخاصة انطلاقا من مبدأين أساسيين. المبدأ الأول هو أن قوانين الفيزياء ينبغى أن تكون واحدة فى كل النظم المرجعية، شريطة ألا تكون خاضعة لعجلة ما، بلا أى استثناء ولا يوجد شيء اسمه المكان المطلق. والمبدأ الثانى هو أن سرعة الضوء ينبغى أن تكون مُعامِلاً ثابتًا لا يرتهن بحركة مصدر الانبعاث، ولا مجال لكل من يقوم بقياس هذه السرعة أن يتوصل إلى نتيجة مختلفة أيًا كانت حركتهم وأن يقيسوا نفس القيمة.

سرعة الضوء

إن ذلك المبدأ الثانى قد يبعث على الدهشة. فنحن معتادون فى الواقع فى الحياة اليومية على أن السرعات تزيد أو تنقص وفقا لكل حالة. فلنتخيل أننى موجود فى قطار ينطلق بسرعة تسعين كيلومترا فى الساعة، وأقرر أن أتحرك للأمام داخل القطار وأسير بسرعة عشرة كيلومترات فى الساعة بالنسبة للقطار. بالنسبة لراصد خارجي يرانى وهو جالس فى الخارج، ستضاف السرعتان وسيبدو له فى الواقع أننى أتقدم بسرعة مائة كيلومتر فى الساعة بالنسبة للأرض. وهذا يعنى إن السرعة هى بالتالى عامل نسبى يرتبط بالإطار المرجعى الذى يتم قياسها به.

لكن ما يبدو صحيحا فى الحياة اليومية لا يكون كذلك بالمرة حين يتعلق الأمر بالضوء. فلنتخيل الآن أحد الفوتونات الضوئية ينتقل بسرعة الضوء فى أحد المعامل وانبعث منه، بوسيلة فيزيائية ما فوتون آخر. لو كان الفوتونان يسلكان اتجاها واحدا، فإننا نتوقع أن يتحرك الثانى بضعف سرعة الضوء بالنسبة للمعمل. غير أن لا شيء من هذا يحدث، حيث ينتقل الفوتون الثانى

بالضبط بسرعة الضوء بالنسبة للمعمل. قد يبدو ذلك مثيرًا للدهشة لكنه نتيجة مباشرة لتجربة مايكلسون. حيث تُظهر تلك التجربة، فى واقع الأمر، أن الضوء ينتشر بنفس الشكل فى الاتجاهين الموازى والعمودى على حركة الأرض. إن سرعة الضوء بالتالى واحدة فى الاتجاهين، ولا تتأثر بأى عوامل مستمدة من تحرك الأرض فى مدارها. وعلى أية حال، فقد أكدت تجارب أخرى عديدة تلك الحقيقة.



ألبرت أينشتاين (١٨٧٩ ـ ١٩٥٥)

التزامن فى النسبية

ولقد كان من شأن تضافر المبدأين السابقين أن فجّرا ثورة فى علم الفيزياء وفى مفاهيم المكان والزمان. لتوضيح بعض النتائج الأساسية لنظرية النسبية الخاصة، فلتتخيل أنك وأحد أصدقائك رائدا فضاء تشكلان فريقا مكلفا بالتحقق من مقتضيات ونتائج نظرية النسبية. سيكون صديقك موجودا فى مكوك فضائى ذى قوة دفع رهيبة تسمح لها بالوصول لسرعة قريبة من سرعة الضوء. وستكون أنت فى محطة فضائية بعيدة عن أى مجال جذبوى. ويقوم صديقك بالمرور

أكثر من مرة بسرعة كبيرة أمام المحطة الفضائية، مع الحرص فى كل مرة على الحفاظ على سرعة ثابتة. فى تلك الشروط، سيكون كل منكما فى إطار مرجعى غير معرض لأى عجلة فى السرعة، بحيث يمكن لمبدأى ألبرت أينشتاين أن ينطبقا عليكما.

فلنبدأ بظاهرة التزامن. فى الحياة اليومية، أى حدثين يقعان فى آنٍ واحد يراهما الجميع متزامنين. فلو أُضىء مصباحان فى آن واحد ستراهما أنت وكل الناس من حولك يضيئان فى وقت واحد؛ بيد أن ذلك ليس صحيحًا فى النسبية الخاصة على نحو ما سوف نرى. إبان مروره الأول، وفى اللحظة التى يمر فيها أمامك تماما، فإن صديقك سيقوم بالتجربة التالية: يتخذ موضعا فى مركز المركبة الفضائية تماما، ويشعل مصباحا ويرصد انتشار الضوء فى الاتجاهين أمام وخلف المركبة. وبما أنه موجود تماما فى مركزها، فإنه سيرى أن ضوء المصباح يصل لطرفى المركبة فى آنٍ واحد بشكل متزامن.

ومن المحطة الفضائية، فإنك سترصد تلك التجربة وتحاول أنت أيضا تحديد الوقت الذى يصل فيه الضوء لطرفى المركبة الفضائية. لكن الأمور ليست بنفس البساطة لأن المركبة بالنسبة لك فى حالة حركة. إنك سوف ترى خلفية المركبة تتقدم وتندفع نحو الأشعة الضوئية المنبعثة من المصباح، فى حين أن مقدمتها بالعكس تبتعد وتميل لتأخير زمن الالتقاء. إذن، بالنسبة لك، سوف تصل أشعة المصباح لخلفية المركبة قبل أن تمس مقدمتها. والحدثان اللذان كانا متزامنين بالنسبة لصديقك لن يكونا كذلك بالنسبة لك.

لم يعد التزامن إذن، وفقا لنظرية النسبية الخاصة، مفهوما مطلقا. لو أن راصدا يرى حدثين يقعان بشكل متزامن فى مكانين منفصلين، لن يراهما راصد آخر فى حالة حركة بالنسبة للأول متزامنين بل سيرى أحد الحدثين يحدث قبل الآخر. ولو كان هناك راصد ثالث يتحرك فى الاتجاه المعاكس، فإنه سيرى الحدث الثانى يقع قبل الأول. إنها ظاهرة غريبة لكن نتائجها تم التحقق منها مرات كثيرة فى تجارب عديدة كما سوف نرى لاحقًا.

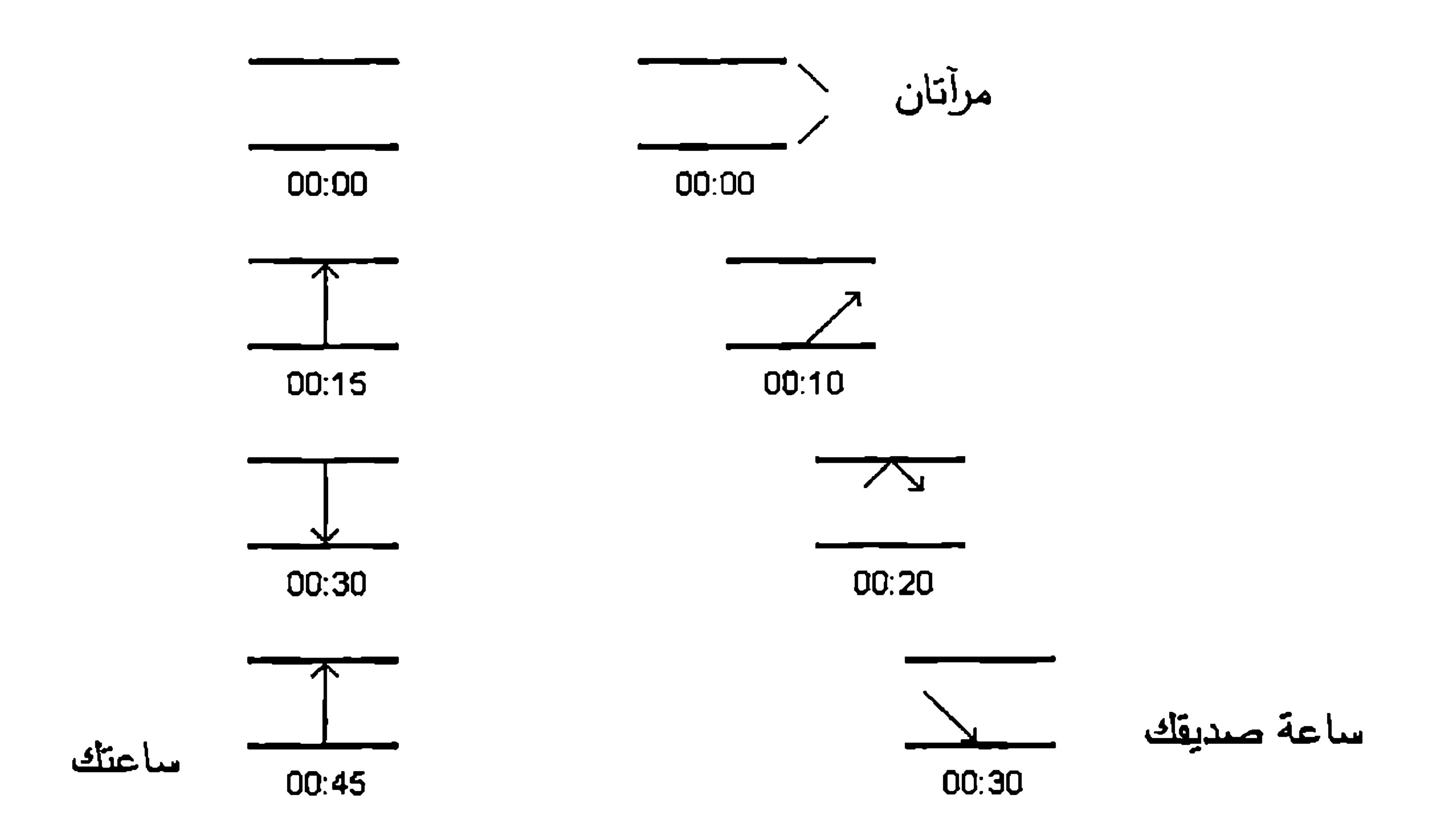
كان من نتائج انهيار مفهوم التزامن الكونى أن أطاح بمفهوم الزمن المطلق. ففى الواقع، كيف نستمر بعد ذلك فى الحديث عن زمن مطلق بمعزل عن كل تأثير خارجي، بينما ليس فى وسع الراصدين المختلفين الاتفاق على الترتيب الزمنى للحدثين؟

تمدد الزمان

فلننتقل لتجربة أخرى. فلتضع الآن فى محطتك الفضائية وفى المركبة ساعتين ضوئيتين. تتكون الساعة الضوئية هذه من مرآتين متواجهتين ومتوازيتين لاتجاه حركة المكوك، مع جهاز صغير ينبعث منه شعاع ضوئى يذهب ويعود بين المرآتين وينعكس بالتبادل عليهما. وتكون فترة مرور الضوء من سطح مرآة لسطح الأخرى ثابتة. يشكل ذلك الجهاز من ثَم آلة لقياس الزمن، حيث يكفى حساب عدد مرات مجىء وذهاب الضوء وتحويل النتيجة إلى مدة زمنية.

بعد تزويد المركبة بهذا الجهاز سيقوم صديقك بمرور جديد بمحرك خامد للحفاظ على سرعة ثابتة للمركبة أمام المحطة الفضائية. فى آلتك لن يحدث أمر غريب، حيث ستمضى الآلة فى قياس الزمن، ويكون النظام ثابتا وينتشر الضوء بشكل عمودى على المرآتين. أما فى آلة صديقك بالمقابل فإن الوضع سيكون مختلفا، فبما أن المركبة الفضائية تتحرك فإنها ستنتقل فيما بين كل انعكاس والذى يليه، ومن ثَم سترى الضوء ينتقل بشكل منحرف بالنسبة للمرآتين، وليس بشكل عمودى. وبالتالى ستقطع الانعكاسات الضوئية مسافة أكبر فى مشوار الذهاب والعودة. لكن سرعة الضوء واحدة بالنسبة للجميع وفقا لأينشتاين، وبالتالى فإن المسافة الأكبر تقتضى زمنا أطول. وتكون النتيجة بالتالى أن فترة الذهاب والعودة للضوء على متن المركبة الفضائية تكون أطول مما تسجله ساعتك. ويعنى ذلك أن الزمن على متن المكوك لا يمضى بنفس الشكل بالنسبة لكل الراصدين. على سبيل المثال، لو أن المكوك ينتقل بسرعة

تساوى خمسة وسبعين بالمائة من سرعة الضوء، فإنك سترى فترة ذهاب الضوء وعودته على متن المركبة تتضاعف بنسبة ١,٥.



تمدُّد الزمان: يمثل الشكل ساعتك الضوئية وساعة صديقك فى أربع لحظات متوالية. تمثل الأسهم انتقال الضوء بين لحظتين وطولها الذى يرتهن بسرعة الضوء، وينبغى أن يكون واحدًا وفقًا لأينشتاين. ساعتك تكون ثابتة والضوء ينتشر بها بشكل عمودى على المرآتين. فى المقابل، فإن ساعة صديقك تنتقل بسرعة بالغة والأشعة الضوئية بها تبدو تنتشر بشكل منحرف.
والمسافة التى يقطعها الضوء فى الذهاب والعودة تكون بالتالى أطول. وبما أن سرعة الضوء ثابتة بالنسبة للجميع، فإن ذلك يعنى أن الذهاب والعودة يمضى وقتًا أطول فى ساعة صديقك عما فى ساعتك.
فالزمن يبدو أنه يمضى بشكل أبطأ عند حافة المركبة الفضائية. وفى حالة الشكل المبين، فإن معامل تمدد الزمان يكون بمقدار (٥, ١).

غير أن ثمة اعتراضًا على هذا المنطق يقول بأن التأثير المرصود يعود لطبيعة آلة الزمن هذه وليس لخاصية من خصائص الزمن نفسه. إن ذلك ليس بصحيح. يكفى وضع ساعة عادية، ميكانيكية كانت أو إلكترونية، بجانب هذه الآلة الضوئية؛ ستكون آلتا قياس الزمن المتجاورتان نتيجتهما واحدة دوما أيًا كان الراصد. وإذا لاحظتم أن الزمن الذى تشير إليه الساعة الأولى يتباطأ، فإن زمن الساعة الثانية سيتعرض للتأثير نفسه.

ولعل مسألة تمدد الزمن تبدو غريبة لكن تم التحقق من هذه الظاهرة بالفعل بشكل تجريبى. ولنلاحظ أيضا أنه ليس لهذه الظاهرة تأثير ملموس على حياتنا اليومية. فكما تظهر التجربة السابقة، لا يكون تمدد الزمان ذا دلالة حقيقية إلا حين تكون السرعة المعنية قريبة من سرعة الضوء. ففى الواقع، ترتهن نسبة التمدد بالسرعة، حيث تكون نسبة التمدد بنحو ١,٥ إذا ناهزت السرعة خمسة وسبعين بالمائة من سرعة الضوء ونحو ٥ عند ثمانية وتسعين بالمائة من سرعة الضوء. لكن بالنسبة للسرعات المعتادة فى الحياة اليومية فإن مُعامل التمدد يكون قريبًا جدًا من واحد، ولا يكون له لهذا السبب أى تأثير. ومن هذا المنطلق إذا كانت الجزيئات فى أجهزة التعجيل تنطبق عليها هذه الظاهرة نظرا للسرعات العالية فيها، فإنها لا تسرى على سيارة أو طائرة، أو على الأقل ليس بنسب قابلة للقياس.

التوأم وظاهرة تمدد الزمن

ومن السمات اللافتة للانتباه لظاهرة تمدد الزمان هو تماثليتها المطلقة. ففى الواقع، كل حركة هى نسبية. من هذا المنطلق، من وجهة نظر صديقك، فإن مركبته هى الثابتة، ومحطتك الفضائية هى التى تتحرك بسرعة الضوء تقريبا. وبالتالى فإنه سيرصد أن فترة الذهاب والعودة على ساعتك الضوئية هى التى تكون الأطول؛ ولهذا السبب نرى الآخرين دائمًا فى حالة تباطؤ وليس فى حالة عجلة أبدًا.

ولعلنا نلمس التغير الشامل فى مفهومنا للزمن فى المثال التالى. فلنتخيل أنك لديك أخ توأم رائد فضاء يقرر القيام برحلة ذهاب وعودة إلى نجم قريب بسرعة نحو ثمانية وتسعين بالمائة من سرعة الضوء. بالنسبة لك، فإن مدة الرحلة ستكون خمسين عامًا. لكن حين ترصد أخاك بواسطة أحد المَرَاقب، فإنك سترى زمنه يمضى بشكل أبطأ بخمس مرات. ولذلك، حين يعود لن يكون عمره قد زاد سوى عشرة أعوام بدلا من خمسين. وستجد نفسك فى نهاية المطاف أكبر من أخيك التوأم بأربعين عامًا. إنه أمر يصعب تخيله، لكن التحقق التجريبى من النسبية لم يدع مجالا للشك فيه. وفى اليوم الذى ستفسح فيه

التطورات التكنولوجية المجال للقيام بمثل تلك التجربة، فإن ذلك سيكون بالضبط هو ما سيحدث.

غير أن هذه الوضعية السابقة تطرح رغم ذلك مسألة بسيطة وهى التى نطلق عليها تناقض التوأمين. فى الواقع، يبدو الوضع للوهلة الأولى تماثليا. فحينما ينتقل أخوك بسرعة تقترب من سرعة الضوء فستلاحظ أن الزمن الخاص به يمضى بشكل أبطأ. لكن بالنسبة له فإنك أنت الذى يبتعد عنه بسرعة وتتعرض لمسألة تباطؤ الزمان. وبالتالى فى عودته لا بد أن يكون أخوك فى آنٍ واحد أكبر منك وأصغر منك. وهو أمر يبدو صعبا بعض الشيء. فى الحقيقة ليس لذلك من دلالة لأن الوضع ليس تماثليا بشكل حقيقى. فالوصول للسرعة الخارقة فى الذهاب والعودة فى الوقت المناسب يقتضى من أخيك الانطلاق بعجلة كبيرة فى الذهاب ثم الإبطاء فى العودة. وسوف يستشعر بشدة ذلك الأثر فى حين أنك ستبقى أنت فى مكانك تنعم بالاستقرار. هناك إذن تباين كامل بين الإطار المرجعى الخاص به والإطار المرجعى الخاص بك. الوضعية إذن ليست تماثلية ولا تناقض فى الأمر.

المكان والكتلة والمكان ـ الزمان

إذا كان الزمان يتأثر بالحركة، فإن المكان يكون مثله. لقد أثبت أينشتاين أن تمدد الزمان يكون مصحوبا بانكماش للمكان. فكل راصد ينظر لجسم فى حالة حركة يرى أحد أبعاده يتناقص. والبعد الذى نعنيه هو الذى نقيسه فى الاتجاه الموازى للانتقال، ذلك أن باقى الأبعاد لا تتأثر.

فلنتخيل أن المكوك الفضائى الخاص بصديقك طوله ستون مترًا وعرضه عشرة أمتار فى وضع السكون. حين تمر تلك المركبة أمامك بسرعة تعادل خمسة وسبعين بالمائة من سرعة الضوء، فإنك سوف تراها دومًا بعرض عشرة أمتار لكن بطول أربعين مترًا بدلاً من ستين.

وثمة نتيجة أخرى للنسبية الخاصة تتعلق بالكتلة. تماما مثل الزمان والمكان، ترتهن كتلة جسم ما بسرعة الراصد الذى يقيسها. فجسم يزن كيلوجرامًا يتحرك بسرعة تعادل ثمانية وتسعين بالمائة من سرعة الضوء، فإن مسلكه يكون كما لو كانت كتلته خمسة كيلوجرامات. إن تلك الزيادة فى الكتلة هى السبب فى أن سرعة الجسم تكون دومًا أقل من سرعة الضوء. ففى الواقع، كلما زادت سرعة تحرك الجسم، زادت كتلته وزادت الطاقة اللازمة لتسارعه. وحين تكون سرعته قريبة من سرعة الضوء، فإن كتلته تزداد بشدة، لدرجة أنه حتى لو توافرت طاقة هائلة، فإنها لا تؤدى إلا لعجلة ضعيفة. وللوصول لسرعة الضوء نفسها، فإن الطاقة المطلوبة تكون لا نهائية، وهو بالتأكيد أمر يستحيل توفيره. وهذا يعنى أن جسما كبير الكتلة لا يمكنه إطلاقا بلوغ السرعة القصوى بشكل مباشر. غير أن ذلك المنطق لا ينطبق بطبيعة الحال على الفوتونات لأنها بلا كتلة، ويمكنها بالتالى التنقل بسرعة الضوء.



هرمان مينكوفسكى (١٨٦٤ . ١٩٠٩)، صاحب تفسير النسبية الخاصة تبعًا لهندسة المكان / الزمان.

ولنذكر فى النهاية أن عدم إمكانية الفصل بين المكان والزمان قادت الفيزيائيين لضمهما لتشكيل مفهوم أكثر عمومية. لقد كان المكان والزمان، وفقا لنيوتن، مفهومين مستقلين تماما، لا يرتبط وجود أحدهما بالآخر. كان من الطبيعى على سبيل المثال التحدث عن وضع جسم ما دون الرجوع للزمن الذى يتم قياسه فيه. لكن فى النسبية، على نحو ما رأينا، فإن المفهومين ملتصقان ولا يمكن فصلهما. ولهذا السبب، ما كانت تلك النظرية أن تتناول إلا أحداثا وأفعالا تحدث فى مكان وزمان بعينهما، حيث لم يعد ثمة معنى للحديث عن المكان أو الزمان بشكل مستقل. وبالتالى وحَّد الفيزيائيون المفهومين فى تركيبة أكثر عمومية رباعية الأبعاد، يكون للمكان فيها ثلاثة أبعاد مع بعد واحد للزمان، ويُدعى ذلك المفهوم الجديد المكان . الزمان.

الجاذبية والعَجَلة

لم يكن ألبرت أينشتاين مقتنعا بما يكفى بنظرية النسبية الخاصة؛ لأنها لم تكن تتناول الأُطُر المرجعية المعجلة. ولم تكن تتماشى مع قانون الجاذبية الكونية كما كان نيوتن قد طرحه.

وعكف أينشتاين لهذا السبب على العمل وتوصل بعد عشرة أعوام من الجهود لنظرية أكثر عمومية تنطبق على كل الأطر المرجعية، وتقدم تفسيرا جديدا للجاذبية وهى نظرية النسبية العامة.

مبدأ التكافؤ

ويمكن تبين نقطة انطلاق أينشتاين عن طريق التجربة التالية: فلنتخيل أن ثمة شخصين محتجزين فى حجرتين متماثلتين، الأولى على سطح الأرض، والثانية معلقة بصاروخ يتحرك فى الفضاء بأقصى عجلة. ثم يُجرى هذان الراصدان تجربة صغيرة وهى، أن يقوما بإسقاط تفاحة من عَلٍ. يجد الأول تفاحته ببساطة تسقط وبالتالى تكون مُعجَّلة تحت تأثير الجاذبية. لكن ما الذى يحدث فى الحجرة الأخرى؟ إن تلك الأخيرة تنطلق لأعلى عن طريق الصاروخ.

مع ذلك، فإن التفاحة التى تم إسقاطها من علٍ لا تتبع نفس الحركة، وتبدو بالنسبة للحجرة معجلة لأسفل وتسقط. ولو أن قوة الصاروخ قد تم اختيارها بشكل ملائم، فإن التفاحة تسقط، تماما مثلما كانت ستسقط على الأرض. بالتالى فإن الراصدين سيختلط عليهما الأمر، أيهما كان فى هذه الحجرة وأيهما كان فى تلك.

إن التجربتين السابقتين تجريان بشكل متماثل تماما. وهذا يعنى إن قوانين الميكانيكا واحدة سواء كنا فى نظام خاضع للجاذبية أو فى نظام معجل. وقد عمم أينشتاين تلك الفكرة على كل قوانين الفيزياء، وأطلق عليها اسم مبدأ التكافؤ. وكان ذلك المبدأ هو نقطة انطلاق النظرية الجديدة التى فجرت ثورة فى علم الفيزياء وبشكل خاص الفيزياء الفلكية.

المادة والزمان

وهناك نتيجتان للنسبية العامة، مستمدتان مباشرة من مبدأ التكافؤ. بداية، حقيقة أن المادة تبطئ الزمان . فلنتخيل تلك التجربة: تخيل أنك موجود على قمة صاروخ فى ذروة حركته المعجلة. وتوجد أسفل الصاروخ ساعة تبعث بإشارة ضوئية كل ثانية، وأنك سترى تلك الساعة وتحاول قياس البرهة التى تفصل بين كل إشارتين. إن سرعة الصاروخ تزداد خلال البرهة بين بث الضوء ووصوله إلى عينك، بما أن الحركة معجلة. ويكون لقمة الصاروخ بالتالى ميل للفرار أمام الأشعة الضوئية، وميل لتأخير وقت التلاقى. إن ذلك التأثير يزداد الإحساس به كلما مر الزمن وزادت سرعة الصاروخ. وتكون فترة مسار الضوء شيئا فشيئا أكثر طولا. ولا تصل الأشعة الضوئية بالتالى لعينك بواقع كل ثانية لكن تصل بإيقاع أبطأ بشكل طفيف. إنك ستلاحظ بهذا الشكل أن الزمن الذى تشير إليه تلك الساعة يمضى بشكل أبطأ من الزمن فى ساعة يدك.

لكن وفقا لمبدأ التكافؤ، تحدث الظاهرة ذاتها إذا كنا بصدد بناية على سطح الأرض بدلا من صاروخ فى حالة تحرك. بالتالى لا بد للزمان أن يمضى بشكل أبطأ فى قاعدة البناية أكثر مما يحدث فى قمتها. وهذا يعنى إن ساكنى الدور الأرضى يهرمون بشكل أبطأ من ساكنى الدور الأخير. إنه تأثير غريب

يبعث على الدهشة لكنه حقيقى وتم التأكد منه بالتجربة. لكن لا تُهرعوا إلى نقل مسكنكم بناء عليه! فجاذبية الأرض ضعيفة للغاية، وهو ما يجعل ذلك التأثير بلا قيمة على الإطلاق. لن يكون الفرق إلا كسرًا ضئيلاً من الثانية بالنسبة لعمر الإنسان.

فلنلاحظ أنه على عكس مبدأ تمدد الزمان فى النسبية الخاصة، فإن تباطؤ الزمان بسبب الجاذبية ليست له صفة العكسية. ففى الواقع، لو أنك كنت فى قاع الصاروخ وترصد ساعة على قمته، فإن العجلة ستجعلك تتسارع تجاه الأشعة الضوئية. وتكون فترة مسار تلك الأشعة أقصر شيئا فشيئا، ويبدو الزمان كما لو كان يمضى بشكل أسرع أعلى الصاروخ. وبالعودة لحالة البناية على سطح الأرض، فإن الزمان يبقى يمضى بشكل أبطأ فى القاعدة.

المادة والضوء

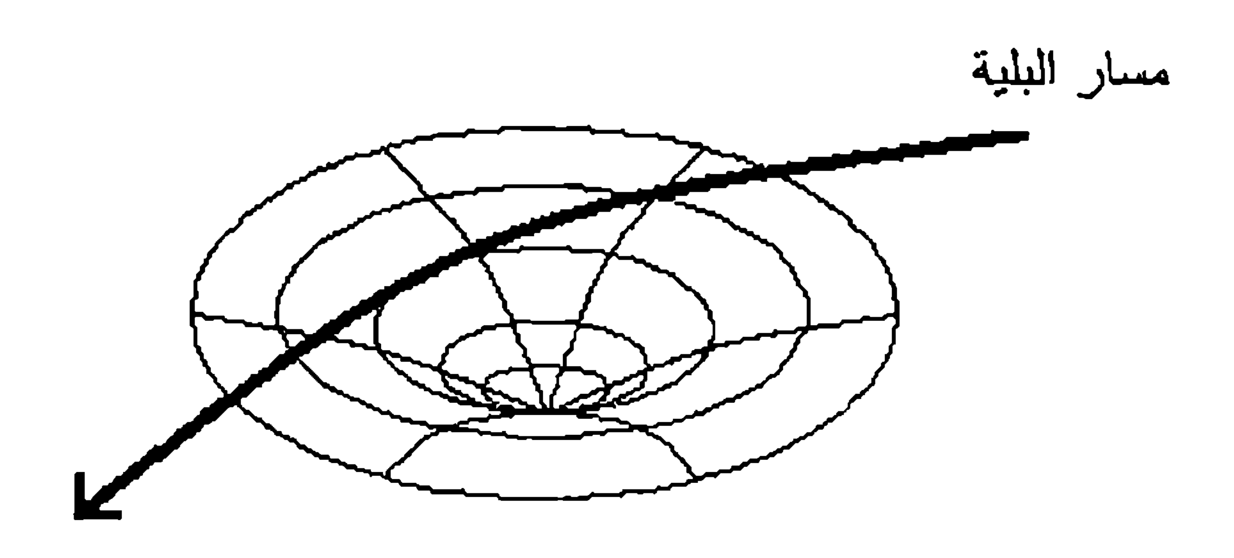
إن النتيجة الفورية الثانية للنسبية العامة هى تأثير الجاذبية على انتشار الضوء. فلنتخيل من جديد أنك فى الصاروخ المتسارع. إنك هذه المرة تضىء بطارية ضوئية وتفرد ذراعك بها عموديا على اتجاه الحركة. الفوتونات هنا ما إن انبعثت تكن مستقلة غير مرتبطة لا بالمصباح ولا بالصاروخ. وتؤدى حركة ذلك الصاروخ لإزاحة طفيفة بين مستوى المصباح ونقطة سقوط الأشعة الضوئية على جدار الصاروخ؛ الأمر الذى يعنى أن الضوء لا ينتقل فى خط مستقيم لكن ينحرف بشكل طفيف نحو الأسفل بالنسبة للصاروخ.

ويقتضى مبدأ التكافؤ أن تكون الوضعية داخل مجال جذبوى مماثلة لحالة الصاروخ. أى فى وجود الكتلة، لا بد أن تنحرف بالتالى الأشعة الضوئية. ويعنى ذلك أنك إذا أضأت مصباحا على الأرض فلن ينتشر الضوء تماما فى خط مستقيم، لكنه سيتبع مسارا منحنيا قليلا بفعل جاذبية كوكبنا. وسيكون التأثير بلا شك ضعيفا للغاية، وبالتالى غير ملموس. لكننا سنرى أنه بالنسبة للمجالات الجذبوية الأقوى، سيكون ذلك التأثير ذا دلالة مختلفة تماما.

النسبية العامة

بتطوير أفكاره، توصل أينشتاين لرؤية جديدة للجاذبية لتحل محل رؤية إسحق نيوتن؛ إنها نظرية النسبية العامة. إن أهم ما تتميز به تلك النظرية هو اختفاء مفهوم قوة الجاذبية. إن حركة جسم ما فى مفهوم أينشتاين لا تحددها قوى معينة، لكن عن طريق نموذج المكان- الزمان. فعلى سبيل المثال، وفقا لنيوتن، الأرض تدور حول الشمس لأن تلك الأخيرة تمارس قوة جذبوية على كوكبنا، فى حين أنه بالنسبة لأينشتاين فإن حركة الأرض تعود لاختلال نموذج المكان- الزمان الناجم عن كتلة الشمس.

ولفهم تلك الفكرة بشكل أفضل فلنلجأ لنموذج محاكاة مكون من بعدين. يمكن مقارنة المكان فى النسبية العامة بنسيج مطاطى. ويمكن تشبيه نجم فى الفضاء ببلية موضوعة على ذلك النسيج، سيكون من شأن هذه البلية أن تغوص فى النسيج مُحْدثة به انخفاضًا. ما الذى يحدث حين يمر جسم ما صغير بالقرب من النجم؟ للإجابة عن ذلك التساؤل، فلنجعل بلية أصغر حجمًا تمر على النسيج. إن مسارها فى البداية سيكون مجرد خط مستقيم، لكن حين تمر بالقرب من البلية الأولى فإنها ستنساق للدخول قليلا فى الانحدار وتحيد بذلك عن الخط المستقيم ويحدث انحناء فى مسارها. إن النقطة المهمة هنا هى أن حركة البليتين على ذلك النسيج المطاطى لا تصوغها قوى ما؛ لكن يمليها ببساطة شكل المكان أو بشكل أكثر دقة منحناه.



المكان مثل نسيج مطاطى. تصنع البلية الأولى انخفاضًا فى النسيج. وتدخل البلية الثانية بشكل طفيف فى ذلك المنخفض، وبالتالى يتعرض مسارها للانحناء.

ومن هذا المنطلق ذاته تتخلى نظرية النسبية العامة عن مفهوم القوة وتستبدل به مفهوم انحناء المكان- الزمان، حيث تحاول الأجرام السماوية اتخاذ مسارات مستقيمة بقدر الإمكان لكنها تنقاد لتخضع لنموذج المكان- الزمان. وبمنأى عن المادة، يكون نموذج المكان- الزمان بلا انحناء، وتكون كل المسارات خطوطًا مستقيمة. أما بالقرب من جسم كبير، فيختل نموذج المكان- الزمان، وتتحرك الأجرام على خطوط منحنية، تكون على سبيل المثال على هيئة قِطْع مكافئ أو إهليج.

ولكى تكون النسبية العامة نظرية كاملة، ينبغى أن تنطوى على وسيلة لحساب منحنى المكان- الزمان الذى ينجم عن توزيع الكتلة. وهى تتيح ذلك بالفعل عبر منظومة شديدة التعقيد من العلاقات الرياضية، وهى معادلات أينشتاين التى تربط بين منحنى المكان- الزمان وتوزيع الكتلة. وتتسم تلك المنظومة بأنها بالغة التعقيد؛ حتى إنه لم يتسنَّ حلها إلا فى حالات معدودة شديدة البساطة، على سبيل المثال حول نجم معزول.

وتجدر الإشارة إلى أنه رغم اختلاف رؤية ألبرت أينشتاين للعالم تمامًا عن الرؤية التى طرحها إسحق نيوتن، فإن النظريتين تقدمان، فى معظم الوقت، نتائج متطابقة عمليا. ولا تظهر الاختلافات إلا فى ظروف قصوى، ربما بالنسبة لأجرام تتحرك بسرعة قريبة من سرعة الضوء، وأجرام تولد مجالات للجاذبية شديدة القوة. وهو ما لا ينطبق على حال الأرض ولا الحياة اليومية المعتادة. ولهذا يهرم الركاب والمشاة بنفس الإيقاع، على غرار سكان الدور الأرضى وسكان الطابق الأخير فى أحد العقارات.

التحقق من النسبية

نظرًا للانقلاب الكلى فى الفيزياء الذى انطوت عليه نظرية النسبية العامة، كان ينبغى بدون شك إثبات أن النظرية صحيحة وأنها ليست مجرد بناء نظرى منمق بل توصيف للعالم الحقيقى. وسرعان ما جاءت التأكيدات الرصدية

العملية الأولى بعد إعلان النظرية، وحتى يومنا لم يأتِ أى اختبار تجريبى بنتيجة تشكك فيها.

دُنوَ أقرب نقطة اقتراب لعطارد

كان التأكيد الأول قد جاء عن طريق أينشتاين نفسه حين قام بتطبيق النسبية العامة على حركة أجرام المجموعة الشمسية. إن مدار الأرض إهليجى، ولو كان كوكبنا وحده هو الذى يدور حول الشمس لكان ذلك الإهليج ثابتا. لكن الأمر ليس كذلك. فالكواكب الأخرى لها تأثير جذبوى وتؤثر بالتالى على حركة الأرض. والنتيجة هى أن الإهليج لا يكون ثابتا لكن يدور حول نفسه ببطء. إن ذلك التأثير يدعى دُنوَ أقرب نقطة اقتراب وهى أكبر اقتراب من الشمس، ويحدث بالنسبة لكل الكواكب ويمكن تفسيره بشكل كامل باستخدام قوانين نيوتن.

لقد أوضحت عمليات الرصد الفلكى أن إهليج كل كواكب المجموعة الشمسية يدور بالسرعة المستنتجة من الميكانيكا الكلاسيكية، عدا عطارد. إن مدار ذلك الكوكب الأقرب من الشمس يدور بصورة أسرع بشكل طفيف مما ينبغى؛ غير أن دنوه من الشمس ضعيف للغاية؛ نحو ثلاث وأربعين ثانية قوسية كل قرن. لكن مع ذلك يمكن رصده على المدى البعيد. هذه هى المسألة التى قام أينشتاين بتطبيق نظريته الجديدة عليها. فى الواقع، فإن اختلال المكان- الزمان حول الشمس يحدث بأقصى صورة فى حالة عطارد، وهى نقطة خلاف محتملة مع فيزياء نيوتن. وقد أظهر أينشتاين فى عام ١٩١٥ أنه بتطبيق النسبية العامة على حركة ذلك الكوكب، فإنه يصل لأقرب نقطة اقتراب من الشمس مساوية للمقدار المقيس فعليًا والتى كانت تشكل نقطة لبس لأجيال من الفلكيين. كان ذلك هو أول تأكيد مُدوٍّ يدلل على حسن تأسيس نظريته.

وبعد ذلك، تم رصد ظاهرة مشابهة ولكن فى هذه المرة فى ثنائى نجمى أحد نجميه بلسار. إن تلك الوضعية تعد نموذجية لأن الرصد الراديوى للبلسار يتيح التعرف على التحركات التى تتم فى داخل الثنائى. فى هذه الحالة يكون دنو أقرب نقطة اقتراب أكبر بكثير من حالة عطارد حيث تصل إلى معدل أربع درجات فى العام، وهو ما أكد مرة أخرى صحة تكهنات النسبية العامة بشكل كامل.

مسار الأشعة الضوئية

وجاء التأكيد الثانى على النسبية العامة فى عام ١٩١٩، حين أكدت عمليات الرصد، بما لا يدع مجالا للشك، على أن مسار الأشعة الضوئية ينحنى فعليا حال وجود كتلة. ولقد أشرنا آنفا إلى أن الشمس تبعث على اختلال هيئة المكان- الزمان حولها، وهو ما يؤدى لانحراف طفيف للأشعة الضوئية التى تمر بالقرب منها. إن ذلك يعنى أنك إذا رصدت نجوما فى وقت تبدو فيه مقتربة من القرص الشمسى، فإن وضعها الظاهرى يكون متغيرا بشكل طفيف. على سبيل المثال، صورة النجوم الأقرب من القرص الشمسى ينبغى تحريكها بنحو (١,٧٥) ثانية قوسية.

وللتحقق من ذلك التكهن، كان ينبغى تنظيم رصد على مرتين. تتمثل العملية الأولى فى التقاط صورة للنجوم القريبة من القرص الشمسى إبان كسوف للشمس حين يكون ضوء الشمس محتجزا وراء القمر. وبعد ذلك التقاط صورة ثانية لنفس المنطقة من السماء حين تكون الشمس قد ابتعدت بشكلٍ كافٍ، بحيث تكون الأشعة الضوئية بعيدة عن أى مؤثرات تبعث على اختلالها. وكان من المتوقع أن تُظهر مقارنة الصورتين بشكل مباشر ما إذا كان وضع النجوم قد تغير. ولقد قام الإنجليزى آرثر إدينجتون وفلكيون آخرون بتلك التجربة فى عام ١٩١٩. ولاحظوا أن وضع النجوم تغير بالفعل بين الصورتين، وأن التغير فى موضع النجوم هنا تماثل مع ما تكهنت به نظرية النسبية. وأكد ذلك النجاح الثانى على مدى صحة محتوى النسبية العامة ومنح أينشتاين شهرة عالمية.

تباطؤ الزمان

يتعلق النوع الثالث من تلك التكهنات بتباطؤ الزمان باتجاه جسم ذى كتلة كبيرة. فقد تم التحقق من النظرية مرة أخرى بالتجربة؛ وذلك بوضع ساعة حائط ذرية على متن طائرة تحلق على ارتفاع عشرة كيلومترات. وتبين أنه فى العودة، كانت الساعة متقدمة بعدة أجزاء من المليار من الثانية بالمقارنة مع ساعة أخرى مماثلة ظلت على الأرض (ينبغى هنا عدم الخلط مع تأثير تمدد الزمان

المرتبط بحركة نسبية وليس بالجاذبية). وتوضح التجربة إن الزمان مضى بشكل أبطأ على سطح الأرض منه على ارتفاع عشرة كيلومترات.

تأثير أينشتاين

وكشفت تجارب أخرى بوضوح عن ظاهرة مرتبطة بالظاهرة السابقة: إنها تأثير أينشتاين. فلنتخيل أن إشعاعا ذا طول موجى محدد انبعث من سطح جسم ذى كتلة كبيرة. بالنسبة لراصد بعيد، يرى الزمن يمضى بشكل أبطأ على سطح الجرم، فإن طول الدورة الترددية للضوء وطوله الموجى يبدو أنه أكثر طولا بشكل طفيف. ولذلك نرى على سبيل المثال، أن الضوء الأصفر يجنح بشكل طفيف إلى الأحمر. لقد تم التحقق من ذلك بالنسبة للإشعاع المنبعث من عدد من المتقزمات البيضاء، حيث تكون الإزاحة فى هذه الحالة بنسبة بضعة أجزاء من مائة ألف جزء. وتم أيضًا قياس تأثير أينشتاين على الأرض، حيث تبين أن الإزاحة فى الطول الموجى بين القاعدة والقمة ببناية يبلغ ارتفاعها عشرون مترًا لا تتجاوز نسبة واحد إلى ألف مليار. ومع ذلك أمكن الكشف عنها والتحقق من توافقها مع النسبية العامة.

الموجات الجذبوية

ومن المرجح أن يكون لأحد تكهنات نظرية أينشتاين دور أساسى فى علم الفلك على المدى القريب. هذا الأمر يتعلق بوجود موجات جذبوية. فحين يتم تعجيل جُسَيم مشحون، فإنه يؤدى إلى خلل فى المجال الكهربائى والمغناطيسى الذى ينتشر بسرعة الضوء. إنها الموجات الكهرومغناطيسية. وبالمثل، إذا تحرك جسم ذو كتلة كبيرة بشكل متسارع، فإن المكان– الزمان من حوله ينبغى أن يعيد تكيفه بشكل مستمر، وهو ما يُترجم فى شكل خلخلات طفيفة تنتشر بسرعة الضوء، ونطلق عليها الموجات الجذبوية.

انبعاث الموجات الجذبوية

تم الحصول على دليل غير مباشر على وجود تلك الموجات فى عام ١٩٧٤، عن طريق الفيزيائيين الفلكيين الأمريكيين چوزيف تيلور وراسل هالز.

فى تلك الفترة كانا يدرسان البلسار (PSR 1913+16) الذى كانت له خصوصية أن يكون طرفًا فى ثنائى يتكون من نجمين نيوترونيين. درس الفلكيان الانبعاثات الراديوية للبلسار ونجحا فى أن يحددا زمن الدورة الترددية المدارية للثنائى النجمى. واكتشفا عندئذ أن تلك الفترة تتناقص بشكل طفيف بمعدل جزء من الألف من الثانية فى العام.

وتم تفسير تلك الظاهرة بأنها نتيجة لانبعاث موجات جذبوية. ففى الواقع، بما أن سرعة النجمين النيوترونيين كانت هائلة وكذلك كتلتهما، فقد أدى تحركهما إلى توليد كَمّ هائل من الموجات الجذبوية. وكانت تلك الموجات تجرف معها قدرا كبيرا من الطاقة. كان لا بد بالتالى أن يفقد الثنائى بعضا من طاقته. وكان ذلك يترجم بتناقص المسافة بين النجمين وبانخفاض زمن الفترة المدارية، وهو التأثير الذى رصده بالضبط تايلور وهالز. وتبين أن تناقص زمن الدورة الذى تم قياسه فى عام ١٩٧٤ يساوى تماما ما كانت النسبية العامة تتكهن به بالنسبة لثنائى نجمى يبعث بموجات جذبوية. كان ذلك إذن بمثابة تحقق جديد من صحة النظرية، لكنه كان بوجه خاص دليلا غير مباشر على وجود تلك الموجات.

وتجدر الإشارة إلى أن التفاعل الجذبوى، حتى لو كان سائدًا على المستوى الكونى الكبير، يتسم بأنه ضعيف إلى أقصى حد بالقياس الميكروسكوبى الدقيق. وبالتالى يكون تفاعل الموجات الجذبوية مع المادة ضعيفا، ومن ثم فمن شأنها أن تخترق بلا مشكلات أى كتلة مهما كانت مركَّزة مثل النجوم النيوترونية، على سبيل المثال. وهذا يعنى أن الكون منفذ بشكل ما للموجات الجذبوية.

تلك الخاصية شكلت أداة يمكن الاستعانة بها فى علم الفلك. ففى الواقع، هناك العديد من الظواهر والتفاعلات الفيزيائية الفلكية التى نعجز حتى الآن عن التعرف عليها. فلا يمكننا، على سبيل المثال، أن نرصد إلا أسطح النجوم، لأن إشعاع المناطق الداخلية بها لا تمكّنه الظروف السائدة من الإفلات. ومن الوارد أن تتيح دراسة الموجات الجذبوية التى تبثها تلك التفاعلات بدراستها

بشكل مباشر، وهو ما سيمثل قفزة كبرى. وقد تفتح تلك الاحتمالية الطريق لدراسة بعض الظواهر ذات الأهمية البالغة فى علم الفلك، مثل الانهيار الجذبوى للنجوم كبيرة الكتلة، أو اندماج نجمين نيوترونيين فى ثنائى نجمى، أو العمليات التى تحدث فى مراكز المجرات أو حتى الظواهر المرتبطة بالثقوب السوداء.

رصد الموجات الجذبوية

بيد أن تلك الميزة للموجات الجذبوية تصبح عيبا حين نحاول اكتشافها. فحين تعبُر مثل تلك الموجة جسما ما، فإن هذا المرور يؤدى إلى تذبذب الجسم، فالشكل الدائرى على سبيل المثال يتحول بشكل مؤقت إلى إهليج. وبذلك نتوقع أن يكون اكتشاف مرورها أمرا سهلا. لكن المشكلة تكمن فى الواقع فى أن الخلخلة تكون ضعيفة للغاية وصعبة الرصد. لفهم تلك الفكرة، فلنتخيل نجما سوبرنوفا ينفجر فى مجرتنا. إننا فى تلك الحالة نكون بصدد حالة مفضلة؛ لأنها من المفترض أن تؤدى إلى تولد جرعة كبيرة من الموجات الجذبوية على مستوى الأرض. غير أن التغير النسبى للحجم فى هذه الحالة لن يتجاوز جزءا من مليار مليار، وهو ما يعادل تغيرا فى المسافة بين الشمس والأرض بمقدار كسر من الميكرومتر. ومثل تلك الدقة فى الرصد بعيدة تماما عن متناولنا فى الوقت الحالى.

لكن الفيزيائيين الفلكيين قبلوا التحدى. فهناك عدة معدات كبيرة وبوجه خاص (فيرجو) و(ليجو) فى سبيلها للإنشاء. إنها مدخالات تعمل وفقا لنفس المبدأ الذى يعمل به نظام ألبرت مايكلسون، تقوم الفكرة الأساسية فى تلك المعدات على تسليط شعاع ليزر ينقسم لحزمتين، ويتم إرسال تلك الحزمتين فى اتجاهين متعامدين ثم تنعكسان بواسطة مجموعة من المرايا ثم تلتقيان فى نهاية المطاف. ويتيح تحليل الضوء بعد تجمعه بالقول بما إذا كانت فترة انتشار الضوء فى أحد الاتجاهين قد اضطربت أم لا. لو حدث اضطراب فإن ذلك يعنى أن المسافة التى قطعتها إحدى الحزمتين قد تغيرت بشكل طفيف تحت تأثير مرور موجة جذبوية.

ونظرا لضعف التأثيرات المتوقع قياسها، فإن تلك المدخالات يجب أن تكون بالغة الدقة، ويجب بوجه خاص أن تكون ذات بناء يتيح للضوء أن يقطع أكبر مسافة ممكنة. لهذا السبب، فإن تلك المستكشفات عملاقة الحجم، ويمتد طول أذرعها لعدة كيلومترات. من الضرورى كذلك إنقاص كل مصادر الضوضاء الطفيلية بقدر المستطاع، وبوجه خاص تلك التى لها طبيعة زلزالية أو حرارية. وعلى الرغم من كل تلك الصعوبات، فإن ثمة ميلاً كبيرًا للتفاؤل، وقد تشهد السنوات القادمة مولد فرع جديد لعلم الفلك يتعلق بدراسة الكون عبر الموجات الجذبوية.

فلْننهِ هذه الجولة بطرح فكرة مشروع شديد الطموح هو الآخر. إن أى عملية رصد تتم على سطح الأرض ستكون فى الواقع محدودة للغاية. ولتحسين نتائج الرصد، فإن الفضاء سيكون الحل الوحيد. من هذا المنطلق، تجرى حاليا دراسة مشروع فضائى يدعى (ليزا). يتعلق الأمر بمجموعة من أربعة أقمار صناعية تعمل بالتنسيق بينها. ومن ثَم؛ بدلا من عدة كيلومترات، فإن الحجم المقابل للمستكشف قد يكون بالتالى ملايين الكيلومترات. قد يؤدى مثل ذلك النظام إلى إتاحة دراسة عدد أكبر من الظواهر المتنوعة، بل قد يقودنا إلى اكتشاف أحداث أكثر بُعدًا.

الثقوب السوداء

يمكن تعريف سرعة التحرر من الأرض بأنها السرعة المبدئية التى ينبغى أن يتحرك بها جسم ما ليتمكن من الإفلات من الشد الجذبوى لكوكبنا. وتبلغ تلك السرعة نحو أحد عشر كيلو مترًا فى الثانية. بهذا الشكل، لإرسال مركبة فضائية لكوكب آخر، فإنه من الضرورى إطلاقها بما لا يقل عن هذه السرعة، وإلا لن تتمكن المركبة من الافلات، وينتهى الأمر إما بأن تسقط على الأرض ثانية أو تتخذ مدارا حول كوكبنا مثل قمر صناعى. ويمكننا بنفس الشكل تحديد سرعة الإفلات بالنسبة لأى جرم سماوى آخر وبوجه خاص النجوم؛

وعلى سبيل المثال، فإن تلك السرعة تكون ستمائة وعشرين كيلومترًا فى الثانية بالنسبة للشمس.

ولقد أشرنا آنفًا إلى أنه حين يصل نجم كبير الكتلة لنهاية حياته فإنه ينهار على نفسه. وتزيد قوة الجاذبية على سطحه بشدة وتزداد بالتالى شيئًا فشيئًا صعوبة الإفلات منه، وتزداد معها سرعة التحرر من النجم. لكن هل يستمر ذلك بشكل لا نهائي؟ تلك هى المسألة التى كان بيير سيمون دى لابلاس أول من تنبه إليها فى نهاية القرن الثامن عشر. ما الذى يحدث لو أن سرعة التحرر من جسم ما زادت لدرجة أنها بلغت سرعة الضوء؟

نهاية حياة النجوم بالغة الضخامة

بالنسبة لعلم الفلك الحديث، فإن الأجسام بالغة الضخامة لم تعد مجالا للتكهنات، بل تحولت إلى مجال الواقع. ولقد سبق أن ذكرنا أن المتقزمات البيضاء لها بالضرورة كتلة تقل عن (١,٤) مثل كتلة الشمس. والنجوم النيوترونية كذلك لا يمكنها أن تتشكل من كمية عشوائية من المادة، حيث أن ضغط التحلل الخلوى للنيوترونات لا يمكنه أن يتحمل إلا جسما أقل من ثلاثة أمثال كتلة الشمس. بالتالى؛ ليس من سبب يحول دون أن تتمكن البقايا النجمية من تجاوز ذلك الحد. ولقد أظهرت دراسة مختلف عمليات فقدان المادة أن نجما ذا كتلة أربعين مرة أكبر من كتلة الشمس، يسفر بعد الانفجار النهائى عن بقايا تزيد كتلتها عن ذلك الحد.

فى هذه الحالة لا تكون النيوترونات إبان الانهيار النهائى قادرة على مقاومة قوة الجاذبية، ولا تتوقف البقايا عند مرحلة النجم النيوترونى، بل تستمر فى الانهيار. وحين يصل حجم هذه البقايا إلى عشرين كيلومترًا فإن كثافة وجاذبية النجم تصل لمستويات بالغة؛ لدرجة أن سرعة التحرر تصل فعليًا لسرعة الضوء.

ولا شك أنه فى مثل هذه الظروف القصوى لن يكون فى وسع فيزياء نيوتن تقديم تفسيرات منطقية مقبولة، ولا مفر من اللجوء للنسبية العامة لوصف الجرم

الذى يتشكل. تُظهر نظرية أينشتاين فى هذه الحالة أن اختلال المكان- الزمان حول البقايا يكون كبيرا بحيث أنه لا شيء ولا حتى الضوء يمكنه الفرار منه. ويكون من ذلك الوقت من المستحيل رصد النجم ولا يظهر منه إلا اضطرابات كثيفة للمكان- الزمان باتجاهه. فقد صار النجم ثقبًا أسود.

الاختفاء يحدث فى وقت يكون فيه مقدار نصف قطر النجم عند ما يسمى بالحد الحرج، وهو حد شفارتزشيلد الذى يرتهن بكتلة النجم. ويحدد نصف القطر هنا بشكل ما مساحة الثقب الأسود. وهو يقترن بالمسافة التى لا يكون الضوء عندها قادرا على الإفلات وعند ذلك ينقطع تماما الاتصال بكوننا. أما البقايا النجمية فبعد تجاوز نصف قطر شفارتزشيلد، تستمر فى الانكماش حتى تصل فى نهاية المطاف لحالة من الكثافة اللانهائية، وتسمى مثل هذه الحال "بالمتفردة"، ويكون المكان- الزمان بها فى حالة خلل لا نهائى.

ما حول الثقب الأسود

فلنَعُد الآن إلى صورة النسيج المطاطى باعتباره يمثل المكان فى نظرية النسبية. إن الثقب الأسود فى هذه الحالة هو بِلْية ثقيلة بدرجة أنها تنغمس بعمق فى النسيج حتى تختفى. إن البلية من الآن فصاعدًا تكون غير مرئية، ولا يدلل على وجودها سوى وجود ثقب فى النسيج المطاطى. وبالمثل، فى الواقع، من المستحيل رؤية ثقب أسود فى السماء لكن يمكننا الاهتداء إليه عبر وجود انحناء فى المكان والزمان باتجاهه.

اعوجاج المكان ـ الزمان

والخصائص الأكثر إبهارًا هى تلك المتعلقة باعوجاج الزمان بالقرب من الثقب الأسود. فعلى نحو ما ذكرنا فيما سبق، يمضى الزمان بشكل أبطأ فى مجال جذبوى قوى. ويزداد الإبهار بشكل خاص فى الحالات القصوى، وهى حالات الثقوب السوداء. فلتتخيل أنك فى سبيلك لأن ترصد من بعيد صديقا مغوارا بما يكفى لأن يقرر الغوص فى ثقب أسود. فكلما اقترب من الثقب

الأسود سوف ترى ساعته تدور بشكل يزداد بطئًا. ستجد الزمن بكل تقاسيمه، الثانية والدقيقة والساعة واليوم...، يستطيل ويستطيل. وفى لحظة بلوغ البقايا نصف قطر شفارتزشيلد ستستطيل مدة الثانية إلى ما لا نهاية. وصورة صديقك ستظل مجمدة إلى الأبد.

وبالنسبة له فى المقابل، ستكون الوضعية معكوسة. فعند قراءته للزمن فى ساعته لن يلاحظ أى شىء خاص. لكن إذا نظر لساعتك سيكون مشدوها. سيرى العقارب تدور بشكل أسرع. فدورة عقرب الساعة ستحدث فى ثانية ثم فى جزء من الألف من الثانية ثم فى ميكرو ثانية. وسيرى حينها حياة النجوم تدور فى كسر من الثانية، ثم بوصوله فى نهاية المطاف لنصف قطر شفارتزشيلد سيتمكن من رصد كل التاريخ المستقبلى للكون. ومن البدهىّ القول بأنه لن تكون هناك تذكرة عودة من مثل هذه الرحلة. فالحدود عند نصف قطر شفارتزشيلد لا تسمح بالمرور إلا فى اتجاه واحد.

غير أن الوصف السابق ليس صحيحا بشكل تام. فالثقوب السوداء عند رؤيتها من الخارج لا تبدو على هيئة مجموعة من الصور لرواد فضاء مذعورين. فى الحقيقة، فإن ثمة تأثيرًا آخر سيتطابق ويتضافر مع تباطؤ الزمان. فعلى نحو ما سبق ورأينا، الضوء يتأثر بوجود جاذبية وفقا لتأثير أينشتاين. كلما كان المجال الجذبوى لجرم ما قويا، ضعفت الفوتونات التى تفر منه وانزاحت نحو الأطوال الموجية الأكبر. بهذا الشكل، حين يقترب صديقك من نصف قطر شفارتزشيلد، فإن الفوتونات التى تشكل صورته ستكون أضعف نشاطا وأقل فاعلية. فتنزاح أولاً نحو الأحمر، ثم تخرج تمامًا من المجال المرئى. وصورته بدلاً من أن تبقى عالقة سوف تختفى شيئًا فشيئًا ليحل محلها سواد مميز عن الجرم المركزى.

ولعلنا نتطرق لنوع أخير من التأثيرات الدرامية وهو الأخذ فى الاعتبار بقوى المَدِّ والجَزْر. فى الواقع، من المستبعد أن تتوافر لصديقك فرصة التمتع بأن يرصدك لوقت طويل. فكثافة المجال الجذبوى تكون هائلة لكن تغيراتها مع المسافة ستكون كذلك هائلة. فلنتخيل أن صديقك ستكون قدماه هما أول ما

يدخل فى الثقب الأسود. مجال الجاذبية الذى يقل كلما طالت المسافة، سيكون أقوى عند مستوى أقدام صديقك عنه عند مستوى رأسه. ذلك يعنى أن أقدام صديقك ستتعرض لعجلة أكبر من رأسه. نتيجة ذلك هى أن جسده سيصير مشدودا باتجاه الطول، أولاً بشكل خفيف ثم بشكل يزداد قوة مع النتائج الفظيعة التى نتوقعها.

الثقوب السوداء الدوَّارة

وثمة ظواهر أخرى مدهشة تحدث حين يكون الثقب الأسود فى حالة دوران وهى الحالة المحتملة معظم الأوقات. حل معادلات النسبية العامة فى تلك الحالة لم يتم التوصل إليها إلا فى الستينيات، وهو دليل إضافى على مدى تعقيد معادلات أينشتاين. إحدى خواص تلك الحالة هى أن المتفردة المركزية ليست محددة الشكل لكن تأخذ شكل حلقة. الخاصية الأخرى هى تأثيرها على المكان- الزمان.

فى الواقع، تأثير الثقب الأسود على الشكل الهندسى للمكان الزمان قوى للغاية. ولا بد إذن أن يكون لدوران الجرم تأثير على هذا الشكل الهندسى؛ بل كذلك على حركة الأجرام التى تمر بالقرب منه. من هذا المنطلق، لو أن راصدًا فى حالة ثبات بالقرب من الثقب الأسود سيجد نفسه ينحرف بشكل طفيف فى اتجاه الدوران. يمكنه بسهولة شديدة مقابلة تلك الحركة بأن يتحرك هو نفسه. لكن بالاقتراب من الثقب الأسود، فإنه يدخل فى منطقة تدعى الأرجوسفير من المستحيل البقاء فى وضع السكون فيها. ورغم شدة مقاومته، فإن دوران المكان- الزمان سيحمل الراصد على التحرك فى شكل حلزونى، بما يشبه بشكل ما مركبًا اقتربت كثيرًا من دوامة. إن ذلك لا يعنى مع ذلك، أنه قد يسقط فى الثقب الأسود. فالأرجوسفير هى منطقة يمكن الإفلات منها شريطة الحرص على عدم بلوغ نصف قطر شفارتزشيلد.

فلنذكر أيضا خاصية للثقوب السوداء تسترعى الانتباه. فعلى عكس كل أجرام الكون الأخرى، فإن الثقوب السوداء يمكن وصفها بشكل كامل بمساعدة عدد ضئيل من المعايير، إذ تكفى معرفة كتلتها وعزمها الزاوى الذى يوصِّف

الدوران، وشحنتها الكهربائية. بهذه البساطة يتم توصيف الثقب الأسود، فلنقارن ذلك بتوصيف متكامل لنجم عادى، إن الأمر يقتضى الأخذ فى الاعتبار بكل الجزيئات الداخلة فى العملية: طبيعتها ووضعها أو طاقتها، وسيتطلب كذلك توافر عدد هائل من المعطيات. أما فى حالة الثقب الأسود، فكل ما يحتاجه المرء من معلومات بشأنها هو ثلاثة معايير. والسبب بسيط، فحين ينهار نجم على نفسه كل المعلومات حول جزيئاته تختفى داخل نصف قطر شفارتزشيلد، وتكون بالتالى مفقودة بالنسبة للعالم الخارجى. والثقب الأسود يبدو حينذاك مجرد اختلال فى المكان- الزمان تكفى ثلاثة عوامل لتحديده.

رصد الثقوب السوداء

الثقب الأسود هو غالبا الجرم الأكثر غرابة الذى كشفت عنه الفيزياء. ومن ثَم يحق لنا التساؤل: هل مثل ذلك الشىء موجود بالفعل أم أنه نتاج الخيال الجامح لعلماء النظريات؟ الإجابة عن ذلك التساؤل تشكل صعوبة بالغة لأن الثقب الأسود، وفقا لتعريفه، غير مرئى بسبب استحالة إفلات أى إشعاع من شدة جاذبيته. من المستحيل بالتالى الحصول على دليل حاسم كصورة فوتوغرافية مباشرة على سبيل المثال.

يتمثل الحل إذن فى محاولة اكتشاف وجود ثقب أسود بشكل غير مباشر من خلال التأثيرات التى يمارسها على جسم آخر. ولقد رأينا فيما سبق أن العديد من النجوم ليست معزولة لكن تنتمى لثنائيات نجمية. وحين يكون أحد طرفَى الثنائى متقزما أبيض أو نجمًا نيوترونيًا يحدث نقل للكتلة وتنتج ظواهر مثل النوفا أو السوبرنوفا. ولو كان أحد النجمين ثقبًا أسود، يمكن أن تحدث ظواهر مشابهة، من كتلة تنتقل وقرص تضخمى يتشكل وارتفاع درجات الحرارة لمستويات قصوى وكميات كبيرة من أشعة إكس تنبعث. وذلك يشكل وسيلة لكشف ثقوب سوداء إن وجدت. يكفى فحسب العثور على مصادر أشعة إكس فى ثنائيات نجمية.

والمشكلة التى تواجهنا هنا تكمن فى حقيقة أن النجوم النيوترونية يمكنها هى الأخرى أن تنتج أشعة إكس بشكل كبير. من الأساسى إذن أن يكون بوسعنا تحديد ما إذا كان المصدر ثقبًا أسود. وثمة وسيلة بسيطة لذلك وهى التوصل لتحديد كتلة الجسم الذى يطلق أشعة إكس. فى الواقع، أظهرت الدراسة النظرية للنجوم النيوترونية أن الكتلة القصوى الممكنة هى ثلاثة أمثال كتلة الشمس. بهذا الشكل، لو تبين أن مصدرًا لأشعة إكس له كتلة أكبر من ثلاثة أمثال كتلة الشمس، يحق التفكير فى أنه ليس نجمًا نيوترونيًا لكن بالأحرى ثقب أسود.

الدجاجة إكس- ١(X1)

المرشح الأول تم الكشف عنه فى بداية السبعينيات عبر القمر (أوهورو) الذى يرصد فى نطاق أشعة إكس. فقد كشف ذلك الأخير فى كوكبة الدجاجة عن مصدر شديد الكثافة يطلق عليه اسم (الدجاجة إكس-١). وفضلاً عن طاقته الهائلة، فإن إشعاع ذلك الجرم كان يتسم بخاصية التذبذب بسرعة قصوى، فى مدة لا تتجاوز أحيانا أجزاء من ألف من الثانية.

تلك التقلبات السريعة كانت تنم عن إن المصدر لا بد أن يكون صغيرًا للغاية. فى الواقع، لكى تؤثر عملية ما على جسم ما بحيث تؤدى إلى تغيير إضاءته بشكل ملحوظ، ينبغى لتلك العملية أن تؤثر على الجسم كله. ذلك يعنى أن هناك بالضرورة تبادلاً للمعلومات بين كل أجزاء الجسم. لكن بما أن تلك التبادلات لا تتم بشكل متزامن، لكن بالأحرى بسرعة الضوء كما تعلمنا النسبية، فإذا كان الضوء يحتاج عاما ليعبر جسما ما، فإن ذلك الأخير لا يمكنه أن يُبدى تغيرات ملحوظة فى خلال زمن من قَبيل اليوم الواحد. نستنتج من ذلك أن التقلبات السريعة لمصدر (الدجاجة إكس-١) تبرهن على أن ذلك الجرم لا بد أن يكون صغيرًا للغاية، بحجم نحو عدة مئات من الكيلومترات.

لكن عمليات الرصد فى نطاق أشعة إكس لم تُتِحْ فى ذلك الوقت تحديد وضع (الدجاجة إكس-١) بدقة. كان ينبغى الانتظار حتى عام ١٩٧٢ لكى

يتحقق ذلك على يد علماء الفلك الراديوى، حيث اتضح لهم أن المصدر (الدجاجة إكس-١) ينبغى أن يكون مرتبطا بشكل أو بآخر بنجم عادى موجود على بعد ستة آلاف سنة ضوئية، وهو النجم (HDE226868) ولا مجال لأن يكون هو نفسه مصدر أشعة إكس. وكشف التحليل الطيفى للنجم عن وجود حركة ذهاب وعودة ترددية لأشعة النجم، الأمر الذى يبعث على استنتاج أنه لا بد أن يكون فى مدار حول جسم آخر. وكان الاستنتاج سهلاً: ذلك النجم (HDE226868) له رفيقٌ هو (الدجاجة إكس-١) قليل الإضاءة بشكل لا يسمح برصده فى النطاق المرئى لكنه كان يجتذب مادة النجم؛ وبالتالى كان ذلك مصدر أشعة إكس.

هل ذلك الرفيق هو ثقب اسود أم نجم نيوتروني؟ بفضل العلاقة بين كتلة وإضاءة النجوم كان الفيزيائيون الفلكيون يعلمون أن ذلك النجم (HDE226868)، وهو من النوع بى، كتلته تعادل ثلاثين مثل كتلة الشمس. وكانوا يعرفون كذلك بفضل تحليل إزاحة الإشعاعات، كيفية تحرك ذلك النجم. وانطلاقًا من تلك المعطيات، كان بمقدورهم تحديد الكتلة المطلوبة لجعل نجم بمثل ثلاثين كتلة الشمس يأتى بمثل ذلك التحرك. النتيجة كانت أن النجم (الدجاجة إكس-١) ينبغى أن يكون جسمًا يبلغ نحو عشرة أمثال كتلة الشمس، وهو ما يزيد كثيرا على حدود كتلة النجوم النيوترونية.

وهذا يعنى أن (الدجاجة إكس-١) هو على الأرجح ثقب أسود، ويدلل على ذلك كتلته وضآلة حجمه فضلاً عن طاقة إشعاعه فى نطاق الأشعة السينية. ينبغى مع ذلك ملاحظة أن ذلك ليس أكيدًا بشكل مطلق. فثمة تشككات تبقى فى حساب كتلة الجرم. فبافتراض أن الأمور سارت بشكل سيئ، وتجمعت الأخطاء كلها فى نفس الاتجاه لكان من الوارد أن تقل كتلة (الدجاجة إكس-١) إلى ثلاثة أمثال كتلة الشمس فحسب وأن يكون بالتالى مجرد نجم نيوترونى. غير أن هذا احتمال مستبعد.

حالات أخرى لثقوب سوداء محتملة

منذ اكتشاف (الدجاجة إكس-١) تم اكتشاف حالات أخرى لنجوم يحتمل أن تكون ثقوبًا سوداء. إنها تُبدى كلها نفس الخصائص: انبعاثات إكس كثيفة ومتغيرة بسرعة وكتلة تزيد على ثلاثة أمثال كتلة الشمس. يمكننا أن نذكر على سبيل المثال (A0620-00) فى كوكبة وحيد القرن و(MC x-1) و(LMC X-3) فى السحابة الماجلانية الكبرى أو (V404 الدجاجة) فى كوكبة الدجاجة. ذلك المثال الأخير هو على الأرجح الأقرب للمنطق بما أن الكتلة الدنيا للجرم ـ مع مراعاة كل التشككات ـ هى ستة أمثال كتلة الشمس أى مرتان من الحد الأقصى لكتلة النجوم النيوترونية.

فى نهاية المطاف، سوف نرى لاحقًا أنه يوجد نوع آخر من الثقوب السوداء، نسخة تزيد كثيرا فى كتلتها على الحالات السابقة، ونجدها فى مركز المجرات، وقد تصل كتلتها لعدة مليارات مثل كتلة الشمس. عمليات رصد ذات طبيعة مختلفة أكدت بشكل شبه يقينى وجود مثل تلك الثقوب السوداء فائقة الكتلة. وتمثل هذه النتيجة بلا شك حجة إضافية لصالح إمكانية وجود ثقوب سوداء مُشكَّلة من بقايا النجوم.

غبار ما بين النجوم

إن الفراغات الهائلة التى تفصل النجوم ليست خاوية كما اعتقد الفلكيون لوقت طويل. فهى فى الواقع مليئة بما نطلق عليه وسط ما بين النجوم، الذى يضم نحو عشرة بالمائة من الكتلة الكلية للمادة بمجرة ما والباقى من الكتلة مركَّز فى النجوم. هذا الوسط يتشكل أساسًا من الغاز لكن أيضًا من الغبار والجزيئات المشحونة بالطاقة وكلها موجودة داخل مجال مغناطيسى. إن ذلك الوسط فى حالة تفاعل متواصل مع النجوم التى تتولد بداخله وتعيش وتموت. وكذلك فى قلبه تحدث التفاعلات الكيميائية التى تسفر عن مولد جزيئات شديدة التعقيد.

ووجود المادة فى الفضاء بين النجمى نما إلى الأذهان فى بداية الأمر كنتيجة اكتشاف مناطق قاتمة فى السماء، ثم تأكد وجوده بوضوح على يد روبرت ترمبلر فى الثلاثينيات. كان ذلك الفلكى الأمريكى يعكف على دراسة مسافات بعض تجمعات النجوم. وبطرح فرضية أن كل التجمعات لها نفس الإضاءة الذاتية ونفس الحجم، فقد استخدم منهجين لتحديد مدى بعدها. أحد المنهجين كان يرتكز على قياس قطرها الزاوى والثانى يرتكز على تحديد إضاءتها الظاهرية. ولاحظ روبرت ترمبلر أن المنهجين يسفران عن نتائج متشابهة بالنسبة للتجمعات النجمية القريبة لكن شديدة الاختلاف بالنسبة للأبعد. فى تلك الحالة الأخيرة كانت الإضاءة الظاهرية أضعف كثيرا، بدرجة أكبر من التبرير ببعد المسافة. لا بد إذن أن الضوء الذى يأتينا من تلك التجمعات البعيدة كان يتخفف إبان مساره، وهو ما لم يكن ليفسر إلا بافتراض أن المناطق التى تبدو خاوية يسودها وسط يمتص الضوء أو يشتته.

ونحن نعلم الآن أن هذه الظاهرة، التى تدعى الانطفاء بين النجمى، راجعة إلى وجود غبار يشتت الضوء. وهذا يعنى أن نسبة من الإشعاع الذى يأتينا من التجمعات النجمية ومن كل الأجرام البعيدة بشكل عام تنحرف عن المسار وتفلت من مَرَاقبنا، وهو ما يفسر إن الإضاءة الظاهرية للأجرام الأبعد تكون أضعف من المتوقع.

وثمة ظاهرة ثانية ترتبط بوجود مادة بين النجوم وهى الاحمرار بين النجمى. تلك الظاهرة ترجع فى الواقع إلى ظاهرة تشتت الضوء وانطفائه وترتبط بشدة بالطول الموجى، وتتجلى فى نطاق الطيف الأزرق عنه فى الأحمر. إذن، الشكل العام لطيف نجم ما يتأثر بوجود الغبار بين النجمى، حيث أن الكثافة فى نطاق الأزرق تقل فى حين أنها فى نطاق الأحمر لا تتأثر إلا قليلا. بالنسبة لراصد أرضى تبدو النجوم أكثر احمرارًا عما هو حالها فعليًا.

فلنلحظ أن نفس الظاهرة تحدث بالنسبة للشمس؛ فالغلاف الجوى الأرضى يشتت من الضوء الشمسى فى نطاق الطيف الأزرق أكثر مما يفعل فى نطاق الأحمر. وحين يكون نجمنا منخفضا قرب الأفق فإن ضوءه يعبر طبقة سميكة

جدًا من الهواء شديدة الكثافة، وهو ما يفسر مظهره الأحمر حينذاك، ويضفى على سمائنا لونها المعروف.

فى بعض الظروف يمكن رصد الغبار بين النجمى بشكل مباشر. تتجسد هذه الحالة عند وجود سحابة من الغبار على مقربة من نجم وتشتت ضوءه. سوف يكون من شأن السحابة فى هذه الحالة أن تبث إشعاعًا يميل إلى زرقة مميزة، ونكون وقتئذ بصدد ما يطلق عليه "سديم بالانعكاس".

وعلى الرغم من أنَّ الغبار يُعزى إليه الجانب الأكبر من التأثيرات الملموسة فى الوسط بين النجمى، فإنه لا يمثل سوى نحو واحد فى المائة من كتلته. ولقد تم تحديد الطبيعة الدقيقة لهذا الغبار عن طريق دارسة الآلية التى يتشتت بها الضوء النجمى. وقد اتضح بهذا الشكل أن الغبار يتكون فى المقام الأول من حبيبات صغيرة صلبة أبعادها أقل من جزء من المليون من المتر. هذه الحبيبات تتكون بشكل أساسى من الكربون والأكسجين والسلسيوم والحديد، وهى محاطة بشكل ما بغلاف رقيق من ثلوج المياه والأمونيا.

ولا يتكون الغبار فى الوسط بين النجمى نفسه لأن ذلك الوسط خفيف للغاية، ومن ثم احتمال التقاء الجزيئات به ليس كبيرًا، وإنما يتكون الغبار فى الواقع فى جوار النجوم التى تكون فى نهاية حياتها نتيجة قذف كميات هائلة من المادة، سواء على هيئة رياح نجمية أو إبان انفجار نجوم السوبرنوفا. وعلى بعد مسافة كافية من النجوم تكون الحرارة قد انخفضت بدرجة تتيح تجمع المادة المنبعثة على شكل ذرات. وتكون الكثافة بها كذلك مرتفعة، الأمر الذى يفسح المجال لأن تتَّحد هذه الذرات وتتحول إلى جزيئات معقدة ثم حبيبات صغيرة من الغبار. وتستمر هذه الحبيبات بعد ذلك فى الابتعاد عن النجم وتنتهى بأن تذوب فى الوسط بين النجمى.

غاز ما بين النجوم

وإذا كان للغبار تأثير مرئى أكثر منه بالنسبة للغاز فإن الغاز فى المقابل يشكل تسعة وتسعين بالمائة من كتلة الوسط بين النجمى. ويتكون هذا الغاز فى

المقام الأول من الهيدروجين، وهو موجود، وفقًا لحرارته وكثافته، على هيئة ذرات أو أيونات أو جزيئات.

الهيدروجين الذرِّى

وتتكون مناطق الحرارة والكثافة المتوسطة من الهيدروجين الذرى. وليس من شأن الغاز، على هذه الهيئة، أن يبث إشعاعا مرئيا وهو ما يعقِّد من إمكان دراسته. كان ينبغى إذن انتظار الوصول لعلم الفلك الراديوى لنتمكن من رصد تلك المناطق وتحديد خواصها. ومن خصائص ذرة الهيدروجين أنها تُصْدر بثًّا فى نطاق الراديو عند طول موجى واحد وعشرين سنتيمترًا. هذا الإشعاع- المرتبط بتفاعل ذى أصل كَمِّى بين البروتون والإلكترون اللذين يشكلان ذرة الهيدروجين- تم اكتشافه للمرة الأولى عام ١٩٥١. ولقد أتاح منذ ذلك الحين دراسة العديد من خواص مناطق الهيدروجين الذرى، مثل توزيعها وحرارتها وكثافتها وأيضًا حركتها.

ولقد تم اكتشاف نوعين مختلفين من المناطق الممتلئة بالهيدروجين: أولاً سحب باردة تصل درجة الحرارة فيها لنحو مائة كلفين تدعى مناطق إتش آى (HI). تتسم تلك السحب بكتلة تعادل خمسين مثل كتلة الشمس وكثافة بنحو بضع ذرات فى السنتيمتر المكعب.. وللمقارنة، فإن كثافة الهواء الذى نتنفسه هى مليار مليار جزىء فى السنتيمتر المكعب. والنوع الثانى هو وسط أكثر سخونة تصل درجة حرارته إلى عدة آلاف كلفين لكن أقل كثافة مع أقل من ذرة واحدة فى المتوسط فى السنتيمتر المكعب. وفى هذا الوسط تسبح المناطق إتش آى.

المناطق المُؤيَّنة

يحتوى كذلك الوسط بين النجوم على مناطق يوجد فيها الهيدروجين على هيئة أيونات. فالإلكترونات والبروتونات لا تكون حينذاك مجمعة فى إطار الذرة لكن تكون منفصلة وحرة. تلك المناطق لها حرارة متوسطة تبلغ عشرة آلاف كلفين. وهى لا تتولد إلا فى بيئات شديدة الخصوصية. إنه الحال، على سبيل

المثال، بجوار النجوم كبيرة الكتلة التى تبث كميات كبيرة من أشعة جاما، أو فى المناطق التى تتعرض لموجات تصادمية. وثمة إمكانية أخرى تتمثل فى المادة التى يتم قذفها إبان انفجار نجم سوبرنوفا. فعلى نحو ما سبق ذكره، يقذف غاز النجوم بسرعة كبيرة للغاية. وحين يختلط ذلك الغاز بالوسط بين النجمى فإن قوى الاحتكاك تسخِّن الغاز وتؤيِّنه. وتؤدى تلك العملية لتولد خيوط ضوئية لامعة تشكل قوقعة بديعة حول بقايا النجم.

وثمة ظروف أكثر شدة من سابقتها كشفت عنها البعثات الفضائية العاملة فى نطاق الأطوال الموجية القصيرة. فلقد اكتشفت هذه البعثات خلفية من أشعة إكس تنبعث من كل اتجاهات السماء. هذه الخلفية المنتشرة مرتبطة بوجود غاز شديد السخونة تزيد حرارته على مليون كلفين يدعى الغاز التاجى، ومصدره غالبًا مرتبط بانفجارات السوبرنوفا، لأنه إبان مثل ذلك الحدث العظيم تتولد فقاعة مِّن الغاز قليلة الكثافة لكن ساخنة إلى أقصى حد، وتتمدد حتى تحيط بالنجم. ومن المحتمل أن يكون هناك الكثير من هذه الفقاعات بجوار الشمس وأن مجموع إشعاعها هو منبع الخلفية المنتشرة فى نطاق أشعة إكس.

لقد كشفت البعثات الفضائية بشكل خاص الفقاعة المحلية وهى منطقة يبلغ قطرها مائة فرسخ تضم الشمس، وكثافة الغاز بداخلها تكون أقل من المتوسط. ويعتقد عدد من الفلكيين أن تلك الفقاعة ترتبط بأنفجار سوبرنوفا قريب شكلت بقاياه البلسار (سيجما التوءَمان)، وهو المصدر شديد الكثافة لأشعة جاما.

الهيدروجين الجزيئى

الصورة الأخيرة لوجود المادة بين النجمية هى سحابة الجزيئات التى تتَّحد بها الذرات لتشكل جزيئات. وتبلغ حرارة تلك السحب عشر درجات من الصفر المطلق وكثافتها تناهز ألف جزىء بالسنتيمتر المكعب. وتتكون هذه السحب أساسًا من الهيدروجين الجزيئى ($H2$) ويصعب رصدها؛ لأن الهيدروجين على هذه الهيئة لا يبث إشعاعات يمكن رصدها بسهولة. ينبغى إذن اللجوء لمكوِّن

آخر فى هذه السحب، وهو مونوكسيد الكربون (CO) الذى يبث إشعاعًا فى أطوال موجية فى حدود الملليمتر.

ولقد بدأت دراسة سحب الجزيئات فى منتصف السبعينيات وكشفت عن أن الأغلبية الكبرى من الهيدروجين الجزيئى موجودة فى سحب عملاقة حجمها يقع بين عشرة ومائة فرسخ. وهذه السحب الجزيئية العملاقة لها كتلة تتراوح بين مائة ألف ومليون مثل كتلة الشمس، ويمكننا أن نحصى منها خمسة آلاف فى مجرتنا.

وكشفت عمليات رصد أخرى عن وجود نحو مائة من أنواع الجزيئات المختلفة فى تلك السحب، من بينها كثير من الجزيئات العضوية ومنها بوجه خاص ما هو أساسى للحياة. والسحب الجزيئية تضم كذلك غبارًا. وبسبب كثافتها المرتفعة نسبيًا، فإن تلك السحب تكون معتمة وتبدو بالتالى فى السماء فى صورة مناطق قاتمة مثل ثقوب بين توزيع النجوم. والمثال المعروف جيدًا هو سديم رأس الحصان.

نشأة النجوم

قد يبعث على الدهشة أن ثمة احتمالاً لوجود تجمعات أضخم حتى من السُحُب الجزيئية العملاقة؛ لأن من الوارد أن تكون قوة الجاذبية السائدة من الشدة بحيث تدفعها للانهيار على نفسها. والواقع أن عديدًا من الظواهر تتدخل لتكفل وجود استقرار نسبى؛ ففى البداية تعمل النجوم القريبة على تسخين الغاز فى السحب وهو ما يؤدى إلى تنشيط الجزيئات، وبالتالى إلى تولُّد قوة ضغط داخلى يمكنه مقاومة الانهيار. ثم إن السحابة لا تبقى ساكنة بل تدور حول نفسها، الأمر الذى يجعل جزيئات الغاز تتعرض لقوة طرد مركزى تمنعها من السقوط لمركز السحابة. وفى النهاية يأتى المجال المغناطيسى بين النجمى لينضم إلى العوامل التى تُسْهم فى كفالة الاستقرار.

تلك الوضعية لا تستمر مع ذلك بشكل دائم؛ لأن ثمة عوامل يمكن أن تعمل على تقويض التوازن وبدء عملية انهيار جذبوى؛ وأول هذه العوامل هو

مرور السحابة فى منطقة ذات كثافة عالية من المادة. ومجرتنا لا تتسم بتوزيع متجانس للمادة لكن تضم مناطق أكثر كثافة من المتوسط. وحين تعُبر سحابة جزيئية عملاقة إحدى تلك المناطق فإنها ستتعرض لقوة ضغط قد تؤدى إلى تقويض التوازن وإحداث انهيار جذبوى. وثمة سبب آخر هو انفجار سوبرنوفا. ذلك الحدث يؤدى لموجة تصادمية هائلة تضغط بعنف المناطق التى تمر بها، ويمكنها بالتالى أن تؤدى لانهيار جذبوى لسحابة جزيئية عملاقة. إن هذا السبب على وجه التحديد هو السيناريو المطروح لتفسير نشأة الشمس.

التفتُّت

وبمجرد أن ينهار الاستقرار فإن السحابة الجزيئية العملاقة لن تنكمش فحسب. فهى تبدأ أولاً فى التفتت لكتل أصغر فأصغر. وقد درس تلك العملية الفيزيائى البريطانى چيمس چينز الذى أظهر فى بداية القرن أن سحابة غاز خاضعة لتأثيرات مضادة لقوى الجذب والضغوط الداخلية، ينتهى بها الأمر إلى الانكماش إذا كانت كتلتها أكبر من حد معين يدعى "كتلة چينز". ذلك الحد يكون ضعيفًا كلما كانت السحابة كثيفة ويكون أكبر كلما كانت الحرارة مرتفعة. واستنادًا إلى ذلك، فإن سحابة كثيفة ستنكمش بشكل أسهل من سحابة خفيفة، وبالنسبة لكثافة معينة فإن سحابة باردة ستنهار بشكل أسهل من سحابة ساخنة. وتحدد "كتلة چينز" حجم السحابة القابلة للانهيار بينما تكون التغيرات التى تتعرض لها تلك الكتلة الحرجة نتيجة الحرارة والكثافة هى التى تحدد سير الأحداث بعد انهيار التوازن.

وبداخل السحابة الجزيئية العملاقة التى اختل توازنها وتفتَّتت إلى كتل مستقلة، نجد من هذه الكتل ما يناهز "حد چينز" ومن ثَم تبدأ فى الانكماش. ومع ازدياد الضغط تتصاعد الكثافة فى كل من تلك الكتل، وهو ما يؤدى إلى تقليص حد كتلة چينز الحرج. النتيجة هى سلسلة جديدة من التفتُّت وانقسام كل كتلة لسحب أصغر وأكثر كثافة. وتستمر "كتلة چينز" بالتالى فى الانخفاض، وهلم جرًا. ويسفر تتابع الانقسامات عن تحول السحابة العملاقة إلى كمية كبيرة من الفتات من الأصغر فأصغر.

وينتهى الأمر بعملية التفتت إلى التوقف. وحتى هذه اللحظة كانت السحب تتسم بأنها شفافة ومن ثَم لم يكن هناك ما يعوق انتشار الإشعاع بشكل حر. وكان ذلك الإشعاع هو ما يخلص السحابة من فائض مخزونها من الطاقة. لكن فى وقت بعينه تصل كتل الغاز لكثافة كافية لتصير معتمة وتمنع الإشعاع بالتالى من إتمام مَهمَّته بتسريب فائض الطاقة. ونتيجة ذلك تبدأ حرارة السحابة التى كانت مستقرة حتى هذا الوقت فى الارتفاع، وهو ما يترجم بزيادة فى "كتلة چينز". وعند مرحلة معينةٍ تكون السحابة ضئيلة الحجم – التى آل إليها الأمر وقت أن كان حد چينز الحرج فى أدنى مستوى– قد صارت كتلتها أقل من أن تتفتت مرة أخرى وكل العملية تتوقف.

مولد نجم

وحين يتوقف التفتت، تكون كل سحابة صغيرة من الغاز قد صارت نجمًا أوليًا يستمر فى الانكماش والتسخين محولاً طاقته الجذبوية لطاقة حرارية. وتبقى الفرصة متاحة لأن يفلت الإشعاع جزئيًا. وتبقى الحرارة بالتالى معتدلة ويكون ضوء النجم فى نطاق الطيف تحت الأحمر. لكن الانكماش يستمر ويصير الغاز فى نهاية المطاف معتمًا. حرارة النجم الأوَّلى تبلغ حينذاك عدة آلاف كلفين ويبدأ النجم فى التألق فى نطاق الضوء المرئى. وبما أن حجمه عند هذه المرحلة يكون هائلاً، فإن النجم الأولى يكون لامعًا الى أقصى حد. وتصل درجة تألقه إلى مائة مثل حال شمسنا الآن.

فى جوف الجرم تزداد الكثافة والحرارة شيئا فشيئا. ويأتى، فى نهاية المطاف، وقت تصل فيه الحرارة المركزية إلى عشرة ملايين درجة، وتبدأ عمليات التفاعل النووى الاندماجى للهيدوجين. فى ذلك الوقت تنتج كمية هائلة من الطاقة تؤدى إلى تولُّد ضغوط داخلية تقاوم قوة الجاذبية؛ الأمر الذى يؤدى لاستقرار الجرم. ويتوقف الانكماش وتكون بداية حياة النجم فى طور التتابع الرئيس.

وفترة نشأة نجم ما تكون أقصر كثيرًا من مدة حياته فى التتابع الرئيس. وهى ترتهن بشدة بكتلة النجم المعنىّ، بالنسبة لنجم مثل الشمس.تصل هذه

الفترة إلى عشرات الملايين من السنين؛ لكنها تقل عن مائة ألف عام بالنسبة لجرم يبلغ عشرة أمثال كتلة الشمس.

ولدواعى الحصر، تجدر الإشارة كذلك إلى أن النجوم ليست كلها تنشأ فى سحب جزيئية عملاقة. فبعضها، من ضمن الأصغر كتلة، يولد انطلاقا من سحب جزيئية أصغر قد تقل أبعادها عن الفرسخ الواحد، تدعى كُرَيَّات روك.

نجوم (تى الثور) وأجرام (هربيج هارو) ومناطق (إتش آى آى)

عادة ما تكون نشأة النجوم مصحوبة بظواهر مبهرة. وفى معظم الأحيان يكون من شأن النجم المشرف على الدخول فى طور التتابع الرئيس أن يفقد كمية كبيرة من الغاز على هيئة رياحٍ نجمية، ويمكنه بهذا الشكل أن يقذف جزءًا كبيرًا من كتلته. ويُدعى النجم حينذاك تى الثور. وتتميز هذه المرحلة ببث قوى للغاية فى نطاق الأشعة تحت الحمراء، لأن الإشعاع المرئى للنجم يتم امتصاصه ويعاد إطلاقه بواسطة الغبار البارد نسبيا الذى يحيط به.

وغالبًا ما يصاحب نشأة النجوم كذلك قذف للغاز على هيئة دفقتين متعامدتين. ويُعزى تفسير محتمل لهذه الظاهرة الأمر إلى وجود قرص مكون من بقايا النشأة حول النجم. وعندما ينتشر الغاز المنطلق من النجم فإنه يصطدم بهذا القرص ويغير مساره إلى اتجاه عمودى على مستوى القرص. وهو ما يؤدى لوجود دفقتين متعامدتين. وعلى مسار الدفقتين نجد أحيانًا تجمعات مركَّزة ضئيلة للغاز أو الغبار. هذه المناطق تستقبل حينذاك كميات كبيرة من الطاقة وتأخذ فى التألق. ونطلق عليها أجسام (هربيج– هارو) ويمكن أن تسفر عن تكوُّن سلسلة متراصة بديعة من السُّدُم الصغيرة اللامعة بامتداد هذه الدفقات.

ومن الحالات الملفتة للانتباه حالة النجوم الأكبر كتلة، إن هذا النوع من النجوم يشهد انهيارا جذبويا سريعا للغاية ويصل بذلك لطوره المستقر بسرعة كبيرة. وهكذا تنشأ نجوم من النوع (أو) (O) أو النوع (بى)(B) وتكون ساخنة

للغاية وشديدة الإضاءة. فى هذه الحالة جزء كبير من الإشعاع النجمى يكون مشحونًا بالطاقة ويكون فى نطاق الطيف فوق البنفسجى. ويؤدى هذا الضوء إلى تسخين الوسط بين النجمى حول النجم. ويتكون هذا الوسط فى المقام الأول من الهيدروجين المُؤيَّن أى من بروتونات وإلكترونات حرة. ويحدث أحيانًا أن يلتقى إلكترون وبروتون ويتحدا ليكوِّنا ذرة هيدروجين. تلك الظاهرة تكون مصحوبة ببث فوتونات حمراء فتأخذ بذلك المنطقة المحيطة بالنجم فى التألق. ويسفر ذلك عن ظهور سديم بديع يدعى منطقة (إتش آى آى) (HII). ومن أمثلة ذلك سديم الجبار الشهير المرئى بالعين المجردة فى كوكبة الجبار.

وتشكل النجوم كبيرة الكتلة وشديدة الإضاءة الموجودة فى داخل منطقة (إتش آى آى) ما نطلق عليه رابطة (OB). وبصفة عامة، سرعان ما تتشتت هذه النجوم بسبب ضعف الجاذبية فيما بينها. وهذا يعنى أن رابطة النجوم تكون فترة حياتها قصيرة للغاية على عكس التجمعات النجمية المكونة من نجوم مرتبطة بالجاذبية وتبقى بالتالى لوقت أطول كثيرًا. فلنلحظ أيضًا أن النجوم كبيرة الكتلة تكون مصدرًا لرياح نجمية قوية وموجات تصادمية تساعد على نشأة النجوم فى المناطق القريبة منها.

[٨]

المَجرَّات

دراسة تاريخية لدرب التبَّانة

إن أروع المشاهد فى سماء الليل، لاسيما حين تكون السماء مظلمة بما يكفى لأن تكون الرؤية واضحة، هو شريط أبيض وضبابى يمتد عبر القبة السماوية؛ إنه درب التبانة. لقد كان جاليليو، بتوجيه منظاره نحو ذلك المشهد فى القرن السابع عشر، أول من ادرك أن الأمر لم يكن يتعلق بمجرد ضوء منتشر. فدرب التبانة فى الواقع يتكون من عدد ضخم من النجوم التى تتركز فى منطقة من السماء على شكل شريط ضوئى. ويصل تركيز النجوم لدرجة تجعل العين البشرية تعجز عن تمييز النجوم عن بعضها البعض، فلا ترى إلا مجرد شريط ضوئى.

لقد حمل شكل درب التبانة، وما يوحيه بأنه يحيط الأرض، الفلكيين، لاسيما الإنجليزى توماس رايت، فى منتصف القرن السابع عشر، على الاعتقاد بأن الشمس والنجوم الأخرى قد تكون موجودة فى شكل نظام مسطح للغاية. وفى القرن الثامن عشر، تقدم الفيلسوف الألمانى إيمانويل كانط بفكرة مفادها أن درب التبانة هو منظومة من النجوم على شكل قرص. وبالنظر فى اتجاه القرص، كان الناس يرون عددًا هائلاً من النجوم التى تبدو متداخلة لدرجة أنها

تظهر على شكل شريط ضوئى. وفى المقابل، لم يكن يُرى فى الاتجاه العمودى على ذلك الشريط سوى بعض النجوم القريبة ولا شىء بعدها، وهو ما يمنح ذلك الإحساس النسبى بالفراغ.

ولم تُتوّج المحاولات الأولى للذهاب لأبعد من ذلك بنجاح ملموس. ففى الثمانينيات من القرن الثامن عشر، بدأ ويليام هرشل، مكتشف كوكب أورانوس، فى أول تحليل كَمّى لبنية درب التبانة. فقد قسم القبة السماوية للعديد من المناطق، وقام بإحصاء عدد النجوم المرئية فى كل منطقة بهدف محاولة تحديد شكل درب التبانة فى الفضاء، وتحديد موضع الشمس بالنسبة لخلفية السماء. وبدا من ملاحظات هرشل أن توزيع عدد النجوم فى درب التبانة منتظم بدرجة أو بأخرى، واستنتج من ذلك أن الشمس موجودة فى مركز القرص المَجرّى.

وفى وقت لاحق، فى بداية القرن العشرين، أجرى الهولندى چاكوبوس كابتين تحليلاً أكثر تقدمًا، ووصل لنفس النتيجة. وقد حاول حتى تحديد حجم درب التبانة وقدّره بعشرة آلاف فرسخ.



وليام هرشل: (١٧٣٨ ـ ١٨٢٢)

ونحن نعلم اليوم أن الاثنين قد أخطئا فى استنتاجاتهما لأنهما لم يضعا فى الحسبان تأثير الوسط بين النجمى. لكن لما كان هذا الوسط يشتت ضوء النجوم على نحو ما أشرنا، فإن إشعاع النجوم، ابتداء من مسافة معينة، يضعف كثيرًا بحيث أننا قد لا نستطيع رصده. وبالتالى، لا يكون بوسعنا أن نرصد سوى نسبة ضئيلة من نجوم درب التبانة، تتمثل فى النجوم الأقرب منها للأرض. بناء على ذلك، فأيًا كان موقع الشمس، فى مركز المجرة أم لا، ما كان لهرشل وكابتين إلا أن يتوصلا لما بدا لهما من توزيع منتظم للنجوم فى السماء، لأنه لم يكن بوسعهما أن يريا سوى المناطق المجاورة للشمس.

ولحسن الحظ بالنسبة لمساعى الإنسان للتعرف على الكون، فإن الوسط بين النجمى لا يخفى الضوء فى الاتجاهات كافة. حيث أن غازات وغبار ما بين النجوم موجودة، مثل النجوم، بتركيز فى طريق درب التبانة. ولما كانت ظاهرة التعتيم بين النجمى (أى امتصاص ضوء النجوم) ضعيفة للغاية فى الاتجاهات الأخرى، فقد أتاحت رغم كل شىء رصد أجرام على المسافات البعيدة. وبفضل ذلك تمكن الفلكيون فى النهاية من تحديد الشكل الحقيقى لدرب التبانة وحجمها وموضع الشمس بها.

هارلو شابلى والقيفاويات

فى عام ١٩١٢، كانت الفلكية الأمريكية هنريتا ليقيت تدرس السحابتين الماجلانيتين، السديمين اللذين يهيمنان على السماء الجنوبية ببهائها. وكانت مهمة هنريتا ليقيت تتمثل فى فحص شرائح فوتوغرافية ملتقطة فى حقب مختلفة بهدف تحديد النجوم التى لم تكن إضاءتها ثابتة على مر الوقت. واكتشفت فى معرض دراستها أن بعضًا من هذه النجوم، التى سُميت فيما بعد بالقيفاويات، كانت شدة ضوئها تتغير بشكل دورى. والأهم من ذلك أن تلك النجوم كانت تتسم بالخاصية التالية: أن إضاءتها المتوسطة كانت كبيرة بقدر ما كانت دورة تغير لمعانها طويلة، ولم يكن يبدو أنها مرهونة بأى عوامل أخرى. وبما أن كل تلك النجوم كانت تنتمى لواحدة أو أخرى من السحابتين الماجلانيتين، فهذا

يعنى أنها موجودة كلها على نفس المسافة من الأرض. إن خاصية تغير اللمعان لا ترجع إلى مسألة البعد عن الأرض، وإنما هى خاصية فيزيائية حقيقية للنجوم ذاتها.



هارلو شابلى:.(١٨٨٥ ـ ١٩٧٢)

ولقد تبين أن تلك الخاصية ذات أهمية كبيرة لأنها أتاحت للفلكيين الاستمرار فى ابتكار مقاييس للمسافات. ففى الواقع؛ لو كان بوسعنا أن نعرف فى آنٍ واحد الإضاءة المطلقة والإضاءة الظاهرية لنجم ما، لكان من اليسير حساب مسافة ذلك النجم من الأرض. لكن الصعوبة تكمن فى تحديد الإضاءة الذاتية للنجم. هنا يأتى دور العلاقة التى توصلت إليها هنريتا ليفيت. فلنفترض أننا نرصد نجمين من القيفاويات لهما نفس دورة الإضاءة، واحدة فى سحابة ماجلانية وأخرى فى منطقة غير محددة. ومن المسلَّم به أن الفرق بين اللمعان الظاهرى لكل من النجمين إنما يعود إلى عامل بعد المسافة، بما أن النجوم القيفاوية المتساوية فى طول مدة دورتها تتساوى كذلك فى شدة إضاءتها المطلقة. وبمعرفة قانون تناقص الكثافة الضوئية مع المسافة فإنه من السهل جدًا حساب مسافة المنطقة قيد البحث، بالنسبة لمسافة السحابة الماجلانية.

لقد أصبح لدى الفلكيين بهذا الشكل منهج جديد لقياس المسافات النسبية. ويتيح ذلك المنهج تحقيق طفرة كبيرة تتجاوز بكثير ما كانت تسفر عنه التقنيات التى ترتكز على اختلاف الرؤية أو نقطة التلاقى، لأنه يُطبق حتى على نجوم لا تكشف عن أى حركة ظاهرة. وتتجلى صحة ذلك أكثر فأكثر كلما زادت شدة الإضاءة الذاتية للقيفاويات والتى قد تصل إلى عشرة آلاف مثل إضاءة الشمس، ويمكن إذن رؤيتها من بعيد جدًا.

التجمعات الكُرِّية

غير أنه بقيت مشكلة مع بداية القرن، وهى: إن البعد الحقيقى للسحابتَين الماجلانيتين لم يكن معروفًا. وبالتالى كان كل قياس يتم بطريقة نسبية ولم يكن من الممكن معرفة البعد الحقيقى لجسم ما من الأرض. ولم تكن القيفاويات القريبة ذات نفع لأنها كانت بالفعل شديدة الابتعاد؛ لدرجة لا تتيح أن يكون لها مقدار من اختلاف رؤية قابل للقياس.

ويرجع الفضل للفلكى الأمريكى هارلو شابلى فى تخطى هذه الصعوبة. لقد استخدم القاعدة العلمية القائلة بأن بعض القيفاويات تُبدى إزاحة زاوية قابلة للقياس على مدى فترة زمنية طويلة بما يكفى. وباستخدام قاعدة إحصائية بسيطة قام بحساب البعد الحقيقى لبعض القيفاويات استنادًا إلى هذه الإزاحة الزاوية، وبالتالى تحديد إضاءتها الذاتية، وتمكن بهذا الشكل من تحديد العلاقة الصحيحة التى تربط طول دورة لمعان النجم القيفاوى وشدة إضاءته المطلقة. ومنذ ذلك الوقت، صار يكفى تحديد فترة دورة تألق النجم القيفاوى لنستخلص منها مقدار إضاءته الذاتية. وبمقارنة ذلك المقدار باللمعان الظاهرى لنجم ما، يمكن حساب مدى بعد الجرم بسهولة.

ولقد طبق هارلو شابلى تلك التقنية الجديدة فى دراسة التجمعات الكُرِّية، وهى مجموعات يمكن أن تضم زهاء مليون من النجوم وتتميز بشكلها الكرى. وكان توزيع التجمعات الكرية فى السماء مختلفا للغاية عن توزيع النجوم. فالتجمعات تغطى كل القبة السماوية وليس فقط شريطا من السماء على غرار النجوم. وفضلا عن ذلك، فإن ذلك التوزيع لم يكن متماثلا فى قبة السماء بما

أن الأغلبية كانت موجودة فى نصف السماء المحيط بكوكبة القوس. وبما أن التجمعات الكرية كانت تضم نجوما من القيفاويات، فقد استطاع هارلو شابلى استخدام منهجه فى تحديد مدى بعدها. كما نجح فى تحديد وضعها الحقيقى فى الفضاء وأنشأ خريطة ثلاثية الأبعاد لتوزيعها. وأظهرت النتيجة التى تم إعلانها فى عام ١٩١٧ أن التجمعات النجمية موجودة على مسافات أكبر من أى تكهنات سابقة، وأنها موزعة على هيئة كرية، وأن مركز تلك الكرة يقع بعيدًا جدًا عن الشمس.

وبناء على ذلك، طرح هارلو شابلى فرضية أن التجمعات النجمية الكرية ترتبط بشكل أو بآخر بمجرة درب التبانة. ومن هذا المنطلق كان لا بد أن يتسم توزيع التجمعات الكرية وتوزيع النجوم بأحجام مماثلة ومركز مشترك. وأدرك الفلكى الأمريكى بهذا الشكل للمرة الأولى أن درب التبانة له حجم هائل. وقد أخرج، بوجه خاص، الشمس من المقر المركزى الذى كان هرشل قد منحها إياه. لقد كانت الأبعاد التى توصل إليها هارلو شابلى أكبر بنحو ثلاث مرات لأنه لم يكن يأخذ فى الحسبان بتأثير عامل التعتيم فى الوسط بين النجمى، لكن، على أية حال، كانت الرؤية الجديدة لدرب التبانة قد ولدت.

المَجرَّة

المجرة

المجرة هى مجموعة من نحو مائتَىْ مليار من النجوم والأغلبية العظمى منها تشكل قرصًا يبلغ قطره نحو ٢٥ ألف فرسخ، أى ما يوازى نحو ٩٠ ألف سنة ضوئية. وذلك القرص مسطح للغاية بما أن سمكه ليس سوى عدة مئات فرسخ، أى نحو جزء من المائة من القطر. وفى مركز المجرة، يوجد تجمع هائل من النجوم قطره خمسة آلاف فرسخ ويدعى الانتفاخ. وثمة هالة كرية قطرها أكبر قليلاً من قطر القرص تحيط بكل شىء. وتحتوى هذه الهالة بوجه الخصوص على مجموعات النجوم الكرية التى أتاحت لهارلو شابلى تحديد حجم المجرة.

وتقع الشمس على بعد ٨ فراسخ فقط من المستوى المركزى للقرص، وهو ما يفسر لماذا يظهر لنا ذلك القرص على هيئة شريط ضوئى فى السماء. وتقع الشمس على بعد ٨٥٠٠ فرسخ، (أى نحو ٢٦ ألف سنة ضوئية)، من مركز المجرة، أى ما يوازى ثلثَى المسافة من المركز إلى الحدود الخارجية. فى النهاية، ففى سمائنا، يقع المركز المَجرِّى فى كوكبة القوس.

الهالة والقرص

تتباين بشدة مكونات كل من القرص والهالة فى خصائصهما. فنجوم الهالة قديمة وقليلة الإضاءة ولونها ضارب إلى الحُمْرة وليس بها من العناصر سوى الهيدروجين والهليوم. فضلاً عن ذلك، فإن الهالة من الناحية العملية تخلو من الغاز والغبار. فى المقابل، فإن نجوم القرص لها نطاقات ممتدة من الإعمار وشدة الإضاءة. ونجد بها بشكل خاص تجمعات (أو بى) (OB) المكونة من أجرام شابة للغاية، كبيرة الكتلة ومضيئة وتنتمى للمنطقة (إتش آى آى) (H II)، والنجوم بها غنية بالعناصر الأثقل من الهيدروجين والهليوم. فضلا عن ذلك، يضم القرص وسطا بين نجمى غنيا للغاية يفسح المجال لاستمرار نشأة النجوم به بشكل نشط.

لقد قاد الفرق الجَلىّ بين نجوم كل من الهالة والقرص الفلكيين لتصنيفهما فى مجموعتين: الجمهرة الأولى المكونة من نجوم القرص والجمهرة الثانية التى تضم نجوم الهالة. ويرجع أصل ذلك التوزيع إلى تاريخ تشكُّل المجرة. ففى مستهل نشأة المجرة، منذ نحو ١٥ مليار سنة، لم تكن تلك الأخيرة سوى سحابة غازية كرية فى حالة دوران. وكانت حينذاك تتكون بشكل حصرى من الهيدروجين والهليوم، وكانا هما العنصرين الوحيدين الموجودين فى تلك الحقبة. وتحت تأثير الجاذبية، انهارت تلك السحابة على نفسها وتسطحت بفعل الدوران. وكانت النتيجة النهائية لذلك هى نشأة قرص مسطح، عمودى على محور الدوران، ويضم الجانب الأكبر من كتلة المنظومة، وبشكل خاص ما بها من غاز.

وتعود نجوم الجمهرة الثانية لهذه المرحلة الأولى، وهو ما يفسر توزيعها الكرى وغياب العناصر الأثقل من الهليوم. فكلها قديمة لأن خلو الهالة من الغاز، لم يعد يتيح لها إنتاج النجوم التى نعرفها فى أيامنا. فنحن لا نرى منها سوى النجوم التى كانت قليلة الوزن بشكلٍ كافٍ لتعيش أكثر من ١٥ مليار عام؛ ومن ثَم هى إذن قليلة الإضاءة وحمراء. إن هذه النجوم توجد الآن فى مدارات لا تتطابق مراكزها مع مركز المَجرَّة ومائلة بالنسبة لمستوى القرص، وتعبر سريعًا ذلك القرص كل مائة مليون سنة.

وتأتى خصائص نجوم الجمهرة الأولى من واقع أن القرص هو بالعكس شديد الثراء بالغاز. حيث يتوالى تشكُّل النجوم به بصورة شديدة الكثافة. ولذلك نجد به نجومًا من كل الأعمار، ومنها من هو فى مطلع الشباب يقل عمرها عن مائة مليون سنة. ومع تتابع أجيال النجوم، فإن الوسط بين النجمى يزداد ثراء بالعناصر الثقيلة التى تتولد فى قلب النجوم، ثم تُحرر إما بواسطة الرياح النجمية أو السُدُم الكوكبية أو انفجارات السوبرنوفا. وهذا يفسر كيف أنه مع الوقت تصير النجوم الجديدة أكثر ثراء بالعناصر الثقيلة.

ولنلاحظ أيضا أن نجوم القرص ليست فى حالة سكون، لكنها تدور حول المركز المجرِّى فى مدارات دائرية. إن سرعة الشمس فى مدارها على سبيل المثال هى ٢٢٠ كم فى الثانية. ولا يدور القرص **كجسم_صلب**، لكنه يخضع لسرعات متباينة. ولذلك فإن نجمين على مسافتين مختلفتين من المركز لا يدوران بنفس السرعة؛ وكلما زادت المسافة **قلَّت** سرعة الدوران. وعلى بعد ٨٥٠٠ فرسخ، فإن نجمنا يكمل، على سبيل المثال، دورته المدارية فى ٢٢٥ مليون سنة.

البنية

يمنعنا الوسط بين النجمى على نحو ما ذكرنا آنفًا، من دراسة المناطق البعيدة على مستوى المجرة. غير أن ذلك ليس صحيحا بالنسبة لكل الأطوال

الموجية. لاسيما نطاقَى الأشعة تحت الحمراء أو موجات الراديو. ولدراسة الهيئة الشاملة للمجرة، يستخدم الفلكيون بشكل خاص أشعة الراديو عند الطول الموجى ٢١ سم، والتى تبثها سحابات الهيدروجين الذرى المنتشرة فى أرجاء درب التبانة كافة.

لقد أظهر ذلك النوع من الدراسات أن الهيدروجين موزع بشكل غير متجانس على المستوى المجرى. فهو يتركز فى الواقع فى عدة شرائط تدعى الأذرع الحلزونية. هذا الاسم مرتبط بطابع تلك المناطق ذات التركيز العالي: إنها تبدو ممتدة من اتجاه المركز المجرى إلى الخارج ملتفة على شكل حلزونى. وقد أظهرت الدراسات حتى ٢١ سم وجود أربعة أذرع حلزونية تُسمى وفقًا للكوكبة التى تظهر بها: القوس والسفينة، قنطورس والصليب الجنوبى، ثم الدجاجة وفرساوس. وهناك كذلك العديد من أطراف أذرع ضئيلة لاسيما "الجبار" الذى توجد الشمس به.

المركز المَجرّى

فلنتوجه الآن بنظرنا صوب الجوف المجرى؛ منطقة مركز المجرة. بسبب الوسط بين النجمى، من المستحيل دراسة تلك المنطقة فى نطاق الضوء المرئى. ويستخدم الفلكيون لهذا السبب عمليات الرصد فى مجال الراديو والأشعة تحت الحمراء وأشعة إكس وجاما، وهى التى كشفت ظواهر معقدة للغاية لا زال فهمنا لها محدودًا للغاية.

فلنبدأ إذن بالاقتراب ببطء من المركز المجرى. على مسافة ٣٠٠٠ فرسخ، يظهر على جوانب المركز ذراعان كبيران يحتويان على عدة ملايين مثل كتلة الشمس، على هيئة غاز الهيدروجين. ويبتعد هذان الذراعان، اللذان كشفت عنهما دراسات عند الطول الموجى ٢١ سم، بشكل سريع للغاية من المركز بسرعات تصل لنحو ١٠٠ كم فى الثانية. إن ذلك الاندفاع السريع ينمُّ عن أن حدثًا عنيفًا للغاية، ربما انفجار سوبرنوفا، كان قد حدث على الأرجح منذ مليون عام فى مركز المجرة.

فلنكمل جولتنا. على مسافة نحو ١٠٠ فرسخ، تظهر بنية معقدة للغاية كشفتها دراسات فى نطاق الراديو والأشعة تحت الحمراء. تتكون تلك البنية من خيوط غازات متأينة عملاقة، تشبه فى شكلها الاندلاعات الشمسية، وهو ما يدعونا للاعتقاد بأن المجال المغناطيسى يلعب دورًا هائلاً فى تلك المنطقة. ويدعى الجزء المركزى فى هذه البنية (القوس أ) (Sagittaire A). إنه يتكون من مجموعة من ثلاثة أذرع صغيرة فى شكل حلزونى لا يتجاوز حجمها الإجمالى ثلاثة فراسخ ومحاط بحلقة غازية من الجزيئات والغبار.

ويوجد فى مركز القوس (أ) مصدر راديوى يُعدُّ مثل مركز المجرة ويدعى أيضا (القوس أ*). إن ذلك المصدر صغير للغاية ويقل حجمه عن عشر وحدات فلكية. ويدور حوله من كل جانب عدد كبير من السحب الغازية المتأينة. وتبلغ سرعتها، التى تم حسابها باستخدام تأثير دوبلر، عدة مئات من الكيلومترات فى الثانية. ولكى تبقى أجسام بمثل تلك السرعة فى مدار ما، فإن جاذبية الجسم المركزى يجب أن تكون قوية للغاية وكتلته يمكن تقديرها بعدة ملايين المرات مثل كتلة الشمس. إن وجود مثل ذلك التركيز من الكتلة فى حيز ضيق بهذا الشكل يبدو جديرًا بالملاحظة؛ إن مثل هذه الظروف تبعث على الاعتقاد بأنه يُعزى إلى وجود أحد الأجرام الأكثر إبهارًا فى علم الفلك الحديث: وهو ثقب أسود هائل الكتلة. غير أن هذا الافتراض موضع جدل حيث أنه لم يتم حتى الآن رصد أى من الظواهر المصاحبة لوجود ثقب أسود.

طبيعة السُدُم

بفضل التقدم المتواصل فى أدوات رصد السماء، أدرك فلكيو القرن الثامن عشر وجود أجرام ضبابية ذات طبيعة غير نجمية أطلقوا عليها اسم السدم. فى هذه الحقبة، قدم الفلكى الفرنسى شارل ميسييه قائمة تضم نحو مائة من تلك الأجرام وأطلق عليها أسماء معروفة، مثل (إم ٣١) (M 31) لمجرة أندروميدا. وفى القرن التاسع عشر، قدم ويليام هرشل وابنه قائمة بأكثر من خمسة آلاف

جرم صارت بعد ذلك الكتالوج العام الجديد (Nouveau Catalogue General) الشهير وبه نفس المجرة أندروميدا باسم (إن جى سى ٢٢٤) (NGC 224).

ونحن نعلم حاليًا أن هذه السدم ليست كلها أجرامًا ذات طبيعة واحدة، لكن يمكن تصنيفها فى مجموعات مختلفة. فنجد بناء على ذلك التجمعات النجمية البسيطة والسحب الغازية، وأيضا أجرامًا خارج المجرة. إنها تلك الأخيرة التى مثلت أكبر الصعوبات بالنسبة للفلكيين، والتى نتطرق إليها هنا. كان الفيلسوف الألمانى إيمانويل كانط من أوائل من تعرفوا على الطبيعة الحقيقية لدرب التبانة. فقد طرح عام ١٧٥٥ فكرة أن تلك السدم الغريبة هى تجمعات هائلة من النجوم لها طبيعة مشابهة للمجرة وموجودة على مسافات بعيدة خارج حدودها. وأطلق عليها اسم الجزر الكونية. بعدِ ذلك، فى عام ١٨٤٥، بدأ لورد روس فى دراسة تلك السدم بمرقب حديث للغاية قطره ١,٦ متر. وقد نجح حينها فى أن يرصد فى بعض منها بنية حلزونية الشكل وشديدة الوضوح، واستنتج من ذلك أن تلك الأجرام هى نظم نجمية متكاملة منفصلة عن درب التبانة.

شابلى فى مواجهة كورتيس

فى بداية القرن العشرين، كان مجتمع علماء الفلك منقسما لمعسكرين، بين مؤيد ومعارض لأطروحة الجزر الكونية. وفى عام ١٩٢٠، جرت مناظرة شهيرة فى واشنطن شهدت مواجهة بين أقطاب المعسكرين. من جانب، كان هارلو شابلى يطرح فكرة أن المجرة كبيرة للغاية بقطر ١٠٠ ألف فرسخ، وهو ما كان يدفعه للاعتقاد بأن السدم الحلزونية هى مجرد أجرام غازية تضمها مجرتنا درب التبانة نفسها. فى الواقع، كانت مقاييس المسافات فى تلك الفترة تؤكد أن السحب الماجلانية موجودة فى حدود المجرة وبالتالى تنتمى إلى هذه السدم كذلك. ونحن نعلم اليوم أنها تبعد فى الواقع بمسافة تعادل مثلَىْ قطر المجرة. لكن بالنظر لعدم دقة قياسات تلك الحقبة، فقد كان التشكك مسألة طبيعية.

أما المعسكر الآخر، فقد كان يقوده هيبير كورتيس ولم يكن مقتنعا بتوصيف هارلو شابلى لدرب التبانة، وكان يشكك فى منهج القيفاويات. كان

هو يعتقد أن المجرة صغيرة نسبيًا ويبلغ قطرها نحو عشرة آلاف فرسخ، وأن السدم هي مجرات أخرى موجودة بعيدًا عن مجرتنا. وكان يستند بشكل خاص إلى عمليات الرصد لما كان يبدو أنه سوبرنوفا في تلك المجرات. وكانت عمليات الرصد هذه تُظهر أن السدم كانت بالفعل مُشكَّلة من نجوم، لكن أيضا أنها كانت شديدة البعد نظرًا لما كان يبدو من إضاءة ظاهرية ضعيفة للانفجارات. ولم تسفر مناظرة عام ١٩٢٠ عن شيء حيث لم يكن بوسع أى من المشاركين تقديم حجة دامغة.

إدوين هابل

وكان عام ١٩١٧ قد شهد افتتاح مِرْقَب قطره (٢,٥٠ متر) بمونت ويلسون بكاليفورنيا. بتلك الأداة، ظل إدوين هابل يدرس سديم المرأة المسلسلة أندروميدا وبشكل خاص أجزاؤه الخارجية. وقد تبين له حينها أن تلك الشرائح الفوتوغرافية تظهر آلاف النجوم الضعيفة فى المواضع التى كان سلفه لا يرون فيها سوى مجرد بقع ضبابية. وانكشف السديم فى النهاية عن مكوناته وانكشف عن طبيعته الحقيقية. وقد اختبر هابل عددًا كبيرًا من الشرائح الفوتوغرافية، ولاحظ أن عدة عشرات من نجوم القيفاويات كانت مرئية بها، الأمر الذى أتاح له إمكانية استخدام منهج هارلو شابلى. وقاس بناء على ذلك طول الدورة الترددية للإضاءة والإضاءة الظاهرية لتلك القيفاويات، وقام بحساب الإضاءة الذاتية باستخدام طول الدورة الترددية، ثم حدد، باستخدام الإضاءة الظاهرية، مدى بعد تلك النجوم عنا. وخلص بحساباته فى عام ١٩٢٣، إلى أن مجرة أندروميدا تبعد عنا بمسافة نحو ٣٠٠ ألف فرسخ، أى أبعد كثيرًا من حدود مجرتنا. ونحن نعلم اليوم أن المقدار الحقيقى لبعد تلك المجرة عنا هو ٧٠٠ ألف فرسخ، والفرق بين الرقمين يعود لواقع أنه يوجد نوعان من القيفاويات خصائصهما مختلفة بشكل طفيف. إذن، لقد كانت النتيجة التى توصل إليها هابل صحيحة على الأقل من الناحية النوعية. وقد أثبت أن السُدُم كانت بالفعل مجموعات متكاملة من النجوم أى مجرات أخرى مشابهة لدرب التبانة. بهذا الشكل، يتبين

لنا مرة أخرى أن الكون ينكر علينا أى تميز بموقع مركزى، وإنما نحن موجودون فى واحد من الكواكب حول أحد النجوم المتناثرة، فى مكان ما من مجرة مثل غيرها.

الأنواع المختلفة من المجرات

بعد التيقن بشكل قاطع من طبيعة المجرات بوصفها كيانات خارجية، بدأ الفلكيون فى دراسة خصائصها. وسرعان ما أدركوا أن المجرات تنقسم إلى أربعة أنواع بحسب شكلها. ووفقًا لمظهرها، تم توصيف المجرات بالبيضويّة والحلزونية وعَدَسية الشكل وغير المنتظمة. فلنتناول الخصائص الرئيسة لتلك الأنواع الأربعة.

المجرات البيضويَّة

تتسم المجرات البيضوية بشكلها البيضوىّ دون وجود بنية داخلية وبلمعان شبه موحد. وقد تكون أيضًا مختلفة الاستطالة. وتشهد المجرات البيضوية نشاطًا داخليًا عنيفًا. فالنجوم تذهب وتأتى بها فى كل الاتجاهات بشكل عشوائى، وهو ما يدلل على إمكان وجود المجرة وبقائها. ففى الواقع، لو لم تكن النجوم فى حالة حركة لكان قد انتهى بها الأمر بأن تسقط نحو مركز المجرة، وتتبعها المجرة كلها تحت تأثير جاذبيتها الخاصة. لكن بفضل حركتها، فإن النجوم تتعرض لقوة طرد مركزى تمنعها من السقوط نحو المركز.

وتتكون المجرات البيضوية بشكل أساسى من نجوم قديمة وحمراء، وتنعدم بها بشكل أو بآخر الأجرام الشابة وكبيرة الكتلة. فضلاً عن ذلك، فإنها لا تضم سوى كمية محدودة للغاية من الغاز والغبار، ومن ثَم يكاد الوسط بين النجمى يكون غير موجود بها. إن هاتين الحقيقتين مرتبطتان بما أن الغاز هو المُقوِّم الضرورى لتشكُّل النجوم، وإذا غاب فلا يمكن لأى نجم جديد أن يتكون، ومن هنا جاء غياب الأجرام الشابة. وقد تشكلت كل النجوم الموجودة فى حقب

قديمة، حين كان الغاز بين النجمى ما زال موجودًا. إنها بالضرورة أجرام لها دورة حياة طويلة للغاية؛ وبالتالى فإنها تكون قليلة الكتلة وحمراء.

المجرات الحلزونية

وتتسم المجرات الحلزونية بأنها أكثر تعقيدًا. إنها تتكون أساسا من عنصرين؛ نواة كُرِّية محاطة بقرص من المادة يظهر به التكوين الحلزونى. وهناك أيضا اختلافات بيِّنة من نواة عملاقة محاطة بأذرع حلزونية صغيرة إلى نواة شديدة الصغر بأذرع شديدة الطول. وتنقسم هذه الفئة من المجرات بعد ذلك لمجموعتين: المجرات الحلزونية الاعتيادية التى تخرج أذرعها بشكل مباشر من النواة، والمجرات الحلزونية القضيبية التى يظهر بها قضيب مركزى كبير أطرافه هى نقطة انطلاق الأذرع. وبالنسبة للمجرات الحلزونية، فإن النشاط الداخلى ليس هو الذى يمنع الانهيار الجذبوى، وإنما دوران المجرة هو الذى يمنعه. فكل نجم يدور فى دائرة حول النواة وتلك الحركة المدارية هى التى تولِّد قوة طرد مركزى. والدوران الشامل للمجرة هو كذلك سبب تسطُّح مجمل المجرة وتكوُّن القرص بها.

وعلى عكس المجرات البيضوية، فإن المجرات الحلزونية تتضمن نجومًا من كل الأعمار والكتل مع كمية كبيرة من الغاز والغبار. هنا أيضا السمتان مرتبطتان بما أن الوسط بين النجمى الغنى يعنى أن هناك أيضًا من المادة ما يكفى لتشكيل عدد كبير من النجوم الجديدة، وهذا يفسر وجود أجرام شابة وكبيرة الكتلة. بيد أن ذلك لا ينسحب على المجرة بوجه عام، لأن الأذرع الحلزونية، فى الحقيقة، هى التى تكون غنية بالمادة بين النجمية وبالنجوم كبيرة الكتلة والإضاءة. لذلك السبب، تبدو الأذرع أكثر لمعانًا وتنفصل عن باقى المجرة لتمنحها طابَعها الحلزونى المميز.

المجرات عَدَسيَّة الشكل

وتوجد بين المجرات الحلزونية والمجرات البيضوية حالة وسيطة هى حالة المجرات عدسية الشكل. إنها تشبه الحلزونية فى أن لها نواة كبيرة وقرصًا

مركزيًا. لكنها تشبه البيضوية فى كونها عديمة الأذرع الحلزونية وتمتلك وسطًا بين نجمى فقيرًا نسبيًا.

المجرات غير المنتظمة

وهناك فى النهاية فئة أخيرة هى المجرات غير المنتظمة، وهى تشمل كل أصناف المجرات غير المنتمية للمجموعات الثلاث السابقة. هذه المجرات لها سمات متنوعة فى معظم الأحوال، كما أنها تكون غنية للغاية بالغاز والغبار، ويمكن تصنيفها لمجموعتين؛ أولاً المجرات التى تتسم بطابع غير منتظم لكن توزيع المادة بها يكون شديد الانتظام. إنها على سبيل المثال حالة السحب الماجلانية، ويُنظر لها اليوم على أنها مجرات حلزونية لم تنجح فى إنهاء تشكُّلها.

النوع الثانى هو المجرات غير المنتظمة بحق، سواء من حيث المنظر أو من ناحية توزيع المادة. وقد يُعزى عدم الانتظام إلى أسباب عديدة، مثل وجود نشاط قوى فى النواة أو التعرض فى الماضى للاصطدام بمجرة أخرى.

الأذرع الحلزونية

وقد تكون المجرات الحلزونية من بين كل الأنواع هى الأكثر روعة. ويبقى أصل التكوين الحلزونى حتى يومنا موضعا لدراسة موسعة. وكانت المحاولة الأولى لتفسيره تعزى الشكل الحلزونى إلى تباين سرعات الدوران للمجرة. فالأجزاء الداخلية تدور بشكل أسرع من الأجزاء الخارجية، ومن الطبيعى أن يؤدى ذلك إلى نشأة البنية الحلزونية مع الوقت.

لكن لو كانت تلك الفرضية صحيحة، لانتهى الأمر بالأذرع إلى الالتفاف على نفسها وتمددها، ولكان من شأنها بالتالى أن تملأ المجرة كلها فى زمن يُقدر بنحو مليار عام، وهو ما لا يتوافق مع نتائج عمليات الرصد الحالية.

ومنذ ذلك الوقت، ظهرت نظريات أخرى. الأولى هى نظرية موجات الكثافة التى طرحها برتيل ليندبلاد. نحن نعلم أن الموجة الصوتية تنتج عن

تغيرات دورية لضغط الغاز. وبالمثل، تتمثل موجات الكثافة فى تغيرات لكثافة المادة. ومن منطلق هذه الرؤية، فإن الأذرع الحلزونية ليست مرتبطة بنجوم بعينها، وإنما هى مناطق يتركز فيها المادة بشكل مؤقت. بهذا الشكل، يمكن للأذرع أن تنتقل على هيئة كتلة بشكل مستقل عن المادة وهو ما يفسر عدم تغير شكلها مع الزمن. وبما أن كثافة المادة مرتفعة فى الأذرع، فإن الغاز يكون مضغوطا بها وهو ما يؤدى لانهيار سحب الجزيئات ونشأة نجوم كبيرة الكتلة ولامعة. وبالعكس، فإن المناطق الموجودة بين الأذرع تكون ذات كثافة منخفضة وبلا نجوم كبيرة الكتلة، وتكون رؤيتها أصعب بكثير. وإذا كانت هذه النظرية تفسر وجود الأذرع الحلزونية فإنها تصطدم بصعوبتين. فهى أولاً لا تتضمن تفسيرًا للظاهرة التى تولِّد موجات الكثافة، ثم إنها لا تفسر كيف تبقى موجات الكثافة بدلاً من أن يكون هناك اتجاه لتشتتها على مدى عدة ملايين من السَنوات.

وثمة نظرية ثانية هى نظرية الانتشار الذاتى لعملية تشكل النجوم. فمن شأن النجوم الكبيرة أن تنهى وجودها بانفجارات هائلة قد تؤدى لانهيار سحب الجزيئات وبالتالى لنشأة نجوم جديدة كبيرة الكتلة. ولو أن الجيل الأول من النجوم كان مصطفًا بطول الذراع الحلزونى لصارت السحب الجزيئية المنهارة والنجوم الجديدة الوليدة، أو نجوم الجيل الثانى بمعنى آخر مصطفة هى الأخرى مثل سابقتها بطول الذراع الحلزونى. بعد ذلك، تتفجر تلك الأخيرة بدورها لتولد جيلا ثالثا أيضا فى نفس الذراع. بهذا الشكل، يبقى الشكل الحلزونى للذراع مع أجيال متعاقبة من النجوم. غير أن هذا المنطق لا يفسر المصدر الأول للشكل الحلزونى الأول. لكن ذلك ليس مشكلة كبيرة. ففى الواقع، من الوارد أن يكون الجيل الأول من النجوم قد نشأ نتيجة اصطدام عشوائى بين سحب الجزيئات، وأن يكون الشكل الحلزونى قد نشأ نتيجة دوران المجرة بسرعات متباينة.

أى النظريتين هو الأقرب إلى الصحة؟ فى الواقع، يبدو أن الآليتين موجودتان وأنهما تؤديان لنشأة أنواع مختلفة من المجرات الحلزونية. وقد تكون

موجات الكثافة طرفًا فى العملية بالنسبة للمجرات التى تمتلك أذرعًا حلزونية رفيعة واضحة ومحددة بشكل جلىّ. إنها بوجه خاص حالة المجرات الحلزونية التى تمتلك قضيبًا مركزيًا يتيح حدوث مثل هذه الظاهرة، أو حالة المجرات التى تعرضت لتفاعلات جذبوية مع مجرات أخرى. فى المقابل، قد يكون الانتشار الذاتى لعملية تكوُّن النجوم بالأحرى هو المنبع بالنسبة للمجرات التى تضم أذرعًا حلزونية غير مكتملةٍ أو سميكة أو غير محددة.

المجرات المتقزمة والمجرات المتعملقة

إن التصنيف العام للمجرات وفقًا لشكلها معروف تحت اسم تصنيف هابل. لكن ثمة تصنيف آخر للمجرات يمكن أن يتم وفقا لكتلتها. لقد اعتقد الفلكيون لوقت طويل أن التباين فى الكتل المَجرِّية محدود لأن كل المجرات المرصودة كانت تبدو ذات كتل متقاربة. على سبيل المثال، فإن كتلة مجرتنا تعادل ٢٠٠ مليار مثل كتلة الشمس ومجرة أندروميدا ٣٠٠ مليار، فى حين أن المجرات الحلزونية الأصغر أو المجرات غير المنتظمة تعادل عشرة مليارات مثل كتلة الشمس.

فى الواقع، مجال تباين الكتل المجرية أوسع من ذلك بكثير، لكن كان من الصعب تبين ذلك. ففى الحقيقة، وحتى وقت قريب، كانت مَرَاقبنا عاجزة عن رصد المجرات الأصغر، وحتى القريب منها، لأن إضاءتها ضعيفة للغاية، وكانت عاجزة كذلك عن رصد المجرات الأكبر لأنها شديدة البعد، وبالتالى فإن إضاءتها أيضًا ضعيفة.

ومع تحسن وسائل الرصد، كشف الفلكيون فى النهاية مجرات جديدة كانت بعيدة تمامًا عن أن تُكتشف، الأمر الذى أدى إلى اتساع مجال تباين الكتل بشكل كبير. ونحن نعلم اليوم أنه توجد أجرام كتلتها صغيرة للغاية وهى المجرات البيضوية المتقزمة والتى لا تتجاوز كتلتها مليون مثل كتلة الشمس.

وأيضًا ثمة أحجام مفزعة وهى المجرات البيضوية المتعملقة والتى قد تصل لعشرة مليارات مثل كتلة الشمس.

وتقترب المجرات البيضوية المتقزمة، بكتلتها المعادلة لمليون مثل كتلة الشمس، من كتلة التجمعات النجمية الكُرِّية، أو تزيد قليلاً. إنها تتكون من عدد محدود من النجوم، وهو ما يجعلها عمليًا شفافة، وبالتالى فإنها تكون صعبة الاكتشاف. وبعضها ليس مرئيًا على الشرائح الفوتوغرافية ولا يظهر إلا بشكل غير مباشر، عن طريق قياسات تذبذب كثافة النجوم فى السماء. لقد كان لتلك المشكلة فى الرصد نتيجة مهمة، وهى أننا نعجز عن رصد المجرات المتقزمة إلا فى حالة وجودها إلى جوارنا مباشرة. إننا لا نعرف إذن إلا خصائص النماذج القريبة. ويشكل ذلك بطبيعة الحال عقبات حين يتعلق الأمر بالسعى إلى معرفة بعض الخصائص، مثل مدى وفرة المجرات المتقزمة بالكون ونسبتها فى كتلته. ولكن، بالنظر إلى ضآلة كتلتها لا بد أن تكون هناك كميات ضخمة من المجرات المتقزمة – وهو ما لا يبدو ممكنًا – لكى تكون لهذه المجرات نسبة تذكر من كتلة الكون.

المجرات البيضوية المتعملقة

فى الطرف الآخر من نطاق تباين الكتل المجرية، نجد المجرات البيضوية المتعملقة التى قد تصل لعشرة مليارات مثل كتلة الشمس، وتتسم بالتالى بأنها تكون شديدة الإضاءة. إن هذه المجرات نادرة للغاية ولا توجد إلا فى قلب بعض التجمعات المجرية، حيث تكون محاطة بعديد من المجرات ذات الكتلة الأكثر اعتدالاً. وتفقد هذه الأخيرة فى كل مرور لها قرب مركز التجمع شيئًا من المادة، ليضاف إلى المجرة المتعملقة حتى يصل بها الأمر فى نهاية المطاف لكتلة تتجاوز الخيال.

يتسع إذن نطاق تباين كتلة المجرات البيضوية ليتراوح بين مليون وعشرة آلاف مليار مثل الكتلة الشمسية. أما بالنسبة للأنواع الأخرى، فى المقابل، فإن التنوع يبدو محدودًا. وتُظهر عمليات الرصد أن المجرات الحلزونية تبقى

محصورة فى نطاق محدود للغاية بين مليار وخمسمائة مليون مثل كتلة الشمس. وتتسم المجرات غير المنتظمة بكتلة أقل، فى المتوسط، وتتراوح بين مائة مليون – بالنسبة للمجرات غير المنتظمة المتقزمة – وخمسين مليار مثل كتلة الشمس.

المجرات ذات النواة النشطة

هناك العديد من المجرات التى تبتعد فى مسلكها عن المجرات المعتادة. تتميز تلك المجرات بوجود منطقة متناهية الصغر فى مركزها تدعى النواة، تنتج بداخلها كمية كبيرة من الطاقة عبر عمليات غير نووية. تُعرف تلك الفئات باسم المجرات ذات النواة النشطة، أو باختصار، المجرات النشطة. ويمكن تصنيفها لأربع فئات رئيسة؛ مجرات سيفرت والمجرات الراديوية والبلازارات والكوازارات. وسوف نستعرض تلك الأنواع الأربعة، ثم نرى كيف نجح الفيزيائيون الفلكيون فى فهمها عن طريق نموذج موحد يستند لوجود ثقب أسود فائق الكتلة.

مجرات سيفرت

منذ بداية دراسة المجرات، تم اكتشاف أجرام ذات أشكال غير اعتيادية. ففى عام ١٩٤٣، على سبيل المثال، قدم كارل سيفرت كتالوجَ للمجرات التى كان لها مظهر حلزونى اعتيادى، لكن كان فى مركزها منطقة شديدة التألق، لدرجة أن ضوءها كان يمكن أن يطغى على ضوء المجرة كلها. منذ تلك الحقبة، تم اكتشاف عدة مئات من المجرات من ذلك النوع.

وتُظهر صور تلك المجرات بالفعل أن الإضاءة المركزية تأتى من منطقة صغيرة نسبيًا، لكن تحليل تغيرات اللمعان يذهب لأبعد من ذلك، ويبرهن على أن النواة لا بد أن تكون فعليًا متناهية الصغر. فى الواقع، أحد خصائص تلك المجرات هو التذبذب الكبير فى لمعان أجزائها المركزية، حيث يتغير ذلك اللمعان بشكل دورى مدة الدورة نحو عدة أشهر، وهو ما يشكل معلومة مهمة جدًا عن حجم المصدر. ففى الحقيقة، ولكى تكون التغيرات مرئية بوضوح،

ينبغـى أن تشـمل الجـرم بأكملـه. ينبغـى إذن أن يكـون هنـاك بـالجرم تبـادل للمعلومـات بـين مختلـف نقـاط النـواة. مـن هـذا المنطلـق - وبمـا أن أى عمليـة اتصـال تتم علـى الأرجـح بسـرعة الضـوء- فمن المستبعد أن يكـون حجـم الجـرم أكبـر مـن المسـافة التـى يقطعهـا الضـوء فـى عدة شـهور. وبنـاء علـى ذلـك فـإن حجم النواة لن يزيد على كسر من السنة الضوئية، وهو مقدار متناهى الصغر بالنسبة لحجم مجرة ما.

وأحد المؤشرات المتعلقة ببنيـة مجرات سيفرت، والتـى أفـادت فـى تجهيـز نمـوذج عـام، هـو وجـود فئتين مختلفتين مـن حيـث شـدة إضـاءة النـواة النشـطة، وطابع طيف ضوء المجرة. هاتان الفئتان هما مجرات (سيفرت ١) وتتسم بنواة شديدة الإضاءة، ويحتوى طيفها على شرائح عريضة وأخرى رفيعة فى آنٍ واحد. ومجرات (سيفرت ٢) ولها إضاءة مركزيـة أقل شدة ولا يتضمن تحليلها الطيفى إلا شرائح رفيعـة. وسـوف نـرى لاحقًا أن ذلك الاخـتلاف مـرتبط بشـكل مباشـر بالتكوين المركزى لتلك المجرات.

المجرات الراديوية

تُعد المجرات الراديوية فئة ثانية من المجرات النشطة، ولكنها مختلفة قليلا لأنـه، فـى هـذه الحالـة، لا تكـون النـواة المركزيـة مرئيـة بشـكل خـاص. إن تلـك المجرات، بيضوية الشكل دومًا، وغالبًا ما تكون فـى قلب التجمـع المَجرِّى، وهـى تتسـم بإشـعاع هائـل فـى نطـاق الراديـو، أكبـر عشـرة آلاف مـرة مـن المجـرات الاعتياديـة. ولقد أظهـر تحليـل الانبعـاث الراديوى أن الأمـر كـان يتعلـق بإشـعاع سـنكروترون تنتجـه إلكترونـات مشـحونة بطاقـة هائلـة، تتحـرك فـى مجـال مغناطيسى بالغ القوة. وكشف علماء الفلك الراديوى أن ذلك الإشعاع ينبعث من منطقتـين عملاقتـين اسـمهما الفصـان الراديويـان، وهمـا موجـودان علـى طرفَـى مستوى المجرة، الأمـر الـذى يعنـى أن مصـدر الإشـعاع الراديـوىّ ثنـائى البنيـة. ويتسم هذان الفصان بصفة عامـة بأنهما أكبـر عشـر مرات من المجرة نفسـها، ويمكن أحيانًا أن يصل حجمهما إلى أكثر من عدة ميجا فرسخ، ويبدو كل من

الفصين دومًا بأنه مرتبط بنواة المجرة بخيوط ضوئية أو انبعاثات من المادة. تلك الانبعاثات، العمودية على المستوى المجرى، تكون مرتبطة بالإلكترونات التى تنبعث من النواة، وتؤدى إلى نشأة الفصوص الراديوية.

البلازارات

الفئة الثالثة من المجرات النشطة هى البلازارات أو أجرام (بى. إل. لاكيرتا) (B. L. .Lacertae). إن تلك الأجرام تبدو محددة الشكل وذات لمعان مبهر وشديد التغير؛ حيث قد تتغير شدة إضاءتها بنسب تصل إلى مائة مرة فى فترات قصيرة للغاية لا تزيد على عدة أسابيع. وقد أظهرت الدراسة المفصلة للبلازارات، فى نطاق الراديو، أن هذه الأجرام الغريبة هى على الأرجح حالة خاصة من المجرات الراديوية. ويُعزى طابعها الخاص ببساطة إلى واقع أن الأرض موجودة تمامًا على محور الانبعاث الراديوى وفصوص الراديو. ويؤكد صحة ذلك التفسير رصد انبعاثات تبدو منطلقة بسرعة أكبر من سرعة الضوء. إن ذلك الخداع البصرى مرتبط بنظرية النسبية ولا يتأتى إلا إذا كانت حركات المادة المنطلقة تجرى بامتداد خط بصرنا. وتم التأكد من الصلة بين البلازارات والمجرات الراديوية عن طريق عمليات رصد عالية النقاء، أظهرت أن البلازارات موجودة فى مركز المجرات البيضوية على غرار حالة المجرات الراديوية.

الكوازارات

فى بداية الستينيات، اكتشف الفلكيون المتخصصون فى الأجرام السماوية التى تبعث موجات الراديو مصادر راديوية قوية للغاية، بدت خصائصها شديدة الغرابة. وبالبحث عن شىء مرئى يمكن أن يجسد تلك المصادر الراديوية، تبين لهم أنها أجرام صغيرة للغاية، وهو ما يوحى بأنها ببساطة قد تكون نجومًا. غير أن النجوم لا تبث بوجه عام موجات راديو، ولا بد إذن أن تكون هذه الأجرام ذات طبيعة مختلفة. وفى انتظار أن تتهيأ الظروف لفهم طبيعتها، أطلق الفلكيون عليها اسم الكوازارات، وهى اختصار لكلمة المصادر شبه النجمية، (Quasi-stellar QUASAR).

وكانت هناك مفاجأة أكبر تنتظر الفيزيائيين الفلكيين الذين أجروا أول عمليات التحليل الطيفى لتلك الأجرام. فى الواقع، كان طيفها يضم شرائح إشعاعية شديدة النقاء لا تنتمى لأى عنصر كيميائى معروف، الأمر الذى بعث مزيدًا من الشك بشأن احتمالات أن تكون تلك الأجرام ذات طبيعة نجمية.

وجاء تفسير ذلك الغموض فى عام ١٩٦٣ عن طريق الهولندى مارتن سميث الذى فهم طبيعة تلك الإشعاعات بدراسة الكوازار (٣ سى ٢٧٣). كان الكوازار، وفقًا لتصوره، جرمًا شديد البعد، ولذلك كان طيفه مُزاحًا بشدة نحو الأحمر. وكانت شرائح الطيف اللامعة تجسد إشعاعات هيدروجين اعتيادية، والتى عادة ما تظهر فى نطاق الأشعة فوق البنفسجية، لكنها، فى هذه الحالة فحسب، مزاحة نحو الجزء المرئى من الطيف الكهرومغناطيسى.

الكوازارات إذن هى الأجرام الأكثر بعدًا والأكثر شبابًا فى الكون المعروف حتى اليوم. وكانت الكوازارات الأولى التى تم رصدها تبدى إزاحة نسبية نحو الأحمر، بمقدار ٠,١. لكن مع الوقت، اكتشف العلماء ما هو أكثر بعدًا: والرقم القياسى الحالى هو كوازار تبلغ إزاحته الحمراء ٥,٨ ويوجد على بعد نحو ١٣ مليار سنة ضوئية. وقد ارتفع عدد الكوازارات المسجلة حتى الآن لأكثر من ٢٠ ألف كوازار.

الخصائص

وإذا كانت الكوازارات رغم بعدها تبدو مصدرًا لانبعاثات قوية، فإن ذلك يعنى أمرًا واحدًا هو أن إضاءتها الذاتية لا بد أن تكون خارقة. وبمعرفة اللمعان الظاهرى ومدى بعدها الذى يمكن تبينه من الإزاحة الحمراء، فإنه من السهل حساب إضاءتها الذاتية. يبدو إذن أن الكوازار ينتج كمية خيالية من الطاقة، ويلمع مثل نحو ألف من المجرات الاعتيادية.

الخاصية الثانية للكوازارات هى نطاق تباينها الشاسع. فى الواقع، فإن إضاءتها يمكن أن تتغير بوضوح خلال فترة تقل حتى عن مدة اليوم بل قد تصل إلى بضع ساعات. وتمامًا مثل حالة مجرات سيفرت، تنمُّ هذه الخاصية

عن مدى ضآلة حجم المنطقة المركزية التى ينبعث منها الإشعاع. فبالنسبة للكوازارات، لا بد أن تكون تلك المنطقة أصغر منها فى حالة مجرات سيفرت، وتساوى بالكاد بضع عشرات أمثال حجم المجموعة الشمسية.

وفى سياق محاولة فهم طبيعة المجرات النشطة، فلنذكر كذلك خاصيتين أخريين؛ أولاً واقع أنه يوجد نوعان من الكوازارات وجه الاختلاف بينهما هو نشاطهما فى نطاق الراديو. فى هذا الإطار، يمكن القول بأن ٩٠ فى المائة من الكوازارات لا يبث أى إشعاع فى ذلك النطاق مثل مجرات سيفرت، فى حين أن ١٠ % منها يظل مصدرًا قويًا لانبعاث الراديو مثل المجرات الراديوية. الخاصية الثانية هى الطبيعة غير الحرارية للإشعاع. فضوء الكوازار لا يتبع قانون بلانك بالنسبة للأجرام السوداء، وهو ما يُعد دليلاً إضافيًا لاستبعاد الإشعاع النجمى كمصدر محتمل للطاقة فيها.

النموذج المُوحَّد للمجرات النشطة

إن الكشف عن المجرات النشطة والكوازارات وضع الفيزيائيين الفلكيين فى مأزق، حيث كان عليهم، لفهم مختلف أنواع المجرات النشطة، أن يتخيلوا مصدرا للطاقة بوسعه توليد قدر من الطاقة بمثل قوة آلاف المجرات، وأن يكون يشغل حيزًا فى الفضاء يزيد بالكاد على حجم المجموعة الشمسية.

الثقوب السوداء فائقة الكتلة

طُرحت فكرتان لكن سرعان ما تم استبعادهما: الفكرة الأولى تفسر الظاهرة بارتطام مجرات لكن دون تولُّد قدرٍ كافٍ من الطاقة، والفكرة الثانية بانفجارات متسلسلة لسوبرنوفا ولَّدت كميات لا يمكن تخيلها من الطاقة. ثم حسم الأمر البريطانى دونالد لايندن بيل فى عام ١٩٦٨ وطرح الفكرة التى أسست التفسير الحديث. ووفقًا له، فإن مصدر طاقة المجرات النشطة قد يكون ثقبًا أسود فائق الكتلة، نسخة أكبر كتلة من الثقوب السوداء التى تنتج عن موت النجوم. وبدلاً من أن تكون أكبر بالكاد من عدة أمثال كتلة الشمس، فإن الثقوب السوداء فائقة

الكتلة تكون لها بين مليون ومليار مثل كتلة الشمس، ولها حجم يبلغ عدة وحدات فلكية.

وبما أنه لا يوجد نجم بمثل هذه الكتلة، فإن مثل هذه الثقوب السوداء لا يمكن أن تكون بشكل مباشر ثمرة انهيار نجمى. فى الحقيقة، آلية تشكُّلها ليست واضحة بعد. قد يتعلق الأمر بنجم كبير الكتلة ينهار ويسفر عن مولد ثقب أسود يكبر شيئًا فشيئًا ويتغذى بنجوم أخرى أو بسحابة غازية عملاقة تنهار تحت تأثير جاذبيتها الخاصة. لكن أيًا ما كان مصدر تلك الأجرام؛ فإن وجودها فى الأحوال كافة مسألة طبيعية تمامًا. ونظرية النسبية العامة واضحة فى تلك المسألة؛ إذا حدث أن تركز مليار مثل كتلة الشمس فى منطقة بحجم المجموعة الشمسية، فإن الوضع سيشبه حالة بقايا النجوم كبيرة الكتلة. حيث سيتعرض المكان والزمان لمقدار فائق من الاعوجاج بحيث لا يصبح حتى بوسع الضوء الإفلات منها.

إن السيناريو السابق هو واقعى بقدر ما تكون كثافة المادة المنتقلة ضعيفة. ففى الواقع، المُعامل الحرج الفيصل فى تشكل ثقب أسود ليس الكثافة (أى كمية المادة فى حجم محدد)، ولكن بالأحرى مدى انضغاطها، (أى العلاقة بين الكتلة وحجم الجرم). بناء على ذلك، فإن الثقب الأسود الناجم عن بقايا نجم يقتضى وجود كثافة هائلة فى حين أن الثقب الأسود فائق الكتلة يمكنه التشكل فى منطقة قليلة الكثافة. يكفى، فى الواقع، وجود كثافة أقل من كثافة الماء وهو أمر غير مستبعد إذا حدث أن تجمع عددٌ كافٍ من النجوم فى حيز محدود.

المادة المحيطة

بلا شك، إضاءة النواة النشطة لا تنبعث من الثقب الأسود الهائل نفسه. إنها ناجمة عن تأثير الأخير على المادة المحيطة التى نشأ منها فى الأصل. فى الواقع، فى نموذج المجرات النشطة، يكون الثقب الأسود محاطًا بقرص متضخم، يبلغ حجمه نحو مائة وحدة فلكية . وثمة ظواهر لزجة تعمل على إسقاط مادة القرص تدريجيًا فى الثقب الأسود. خلال هذه العملية، يحول الغاز

طاقته الجذبوية إلى طاقة حرارية، وهو ما يؤدى إلى زيادة كبيرة فى حرارة القرص. لهذا السبب، يواصل ذلك الأخير بث إشعاع حرارى متواصل شديد القوة فى نطاق الأشعة فوق البنفسجية وأشعة إكس. تماثل هذه العملية من حيث المبدأ ما يحدث عند انهيار سحابة الجزيئات التى ترتفع درجة حرارتها وهى تنكمش. ويبدو أن هذه الطريقة لإنتاج الطاقة تفوق كثيرًا فى فاعليتها التفاعلات النووية التى تغذى النجوم، ولعل ذلك هو السبب الذى يجعل النويات النشطة تبدو تضوى مثل عدة مجرات.

القرص المتضخم محاط بمنطقة توجد بداخلها العديد من السحب الغازية. وتلك الأخيرة هى المسئولة عن بعض خطوط الانبعاثات الإشعاعية التى تظهر فى طيف المجرات النشطة. وتدور تلك السحب فى مدار حول المركز بسرعة شديدة. وتتعرض خطوط الإشعاعات بسبب تأثير دوبلر لإزاحة ترتهن بسرعتها. وعند تحليل الضوء الخاص بمجموع السحب، فإن الطيف الشامل يتألف من انطباق عدد كبير من الخطوط الرفيعة المزاحة بعضها عن بعض، ويؤدى هذا الانطباق إلى اتساع الخطوط الإشعاعية فتظهر على هيئة شرائح فى الطيف الشامل. إنها تلك الإشعاعات العريضة التى نرصدها فى مجرات سيفرت من النوع الأول.

ثمة حزام سميك من الغاز والغبار بقطر يُقدر بنحو ١٠ آلاف وحدة فلكية، أى بضعة أعشار الفرسخ يحيط بمناطق السحب السريعة ولكنه موجود فى المستوى المحدد بالقرص المتضخم. إن ذلك الحزام غير منفذ للضوء المرئى أو الأشعة فوق البنفسجية، وهو يمنع إشعاع القرص المتضخم وإشعاعات السحب السريعة من الانتشار فى مستوى المنظومة. إن هذا الحزام المعتم الذى يُفسر، باحتجاز الضوء فى بعض الاتجاهات، هو السبب وراء نشأة مختلف أنواع المجرات النشطة.

ولا تتأثر المناطق الموجودة فى اتجاهات عمودية على القرص بوجود هذا الحزام. وهى عامرة بسحب الغاز التى تدور حول الثقب الأسود على مسافة فى

حدود المائة فرسخ. ولذلك تتباعد تلك السحب بشكل بطىء نسبيًا. ويكون تأثير دوبلر ضعيفًا ومن ثم تبقى انبعاثاته الإشعاعية رفيعة. وفى نفس تلك المناطق، تنطلق دفقات للمادة، وتتكون هذه الدفقات من جسيمات مشحونة بشدة بالطاقة تنبعث من مناطق قريبة من الثقب الأسود، وتفلت وتنطلق بامتداد محور دوران المنظومة. وتؤدى هذه الظروف بعد ذلك إلى تولُّد دفقات رفيعة للغاية قد تمتد لأطوال فائقة، تصل أحيانًا حتى ميجا فرسخ. إن تلك الجسيمات شديدة الطاقة هى مصدر الإشعاع السينكروتروني الراديوى ببعض المجرات النشطة.

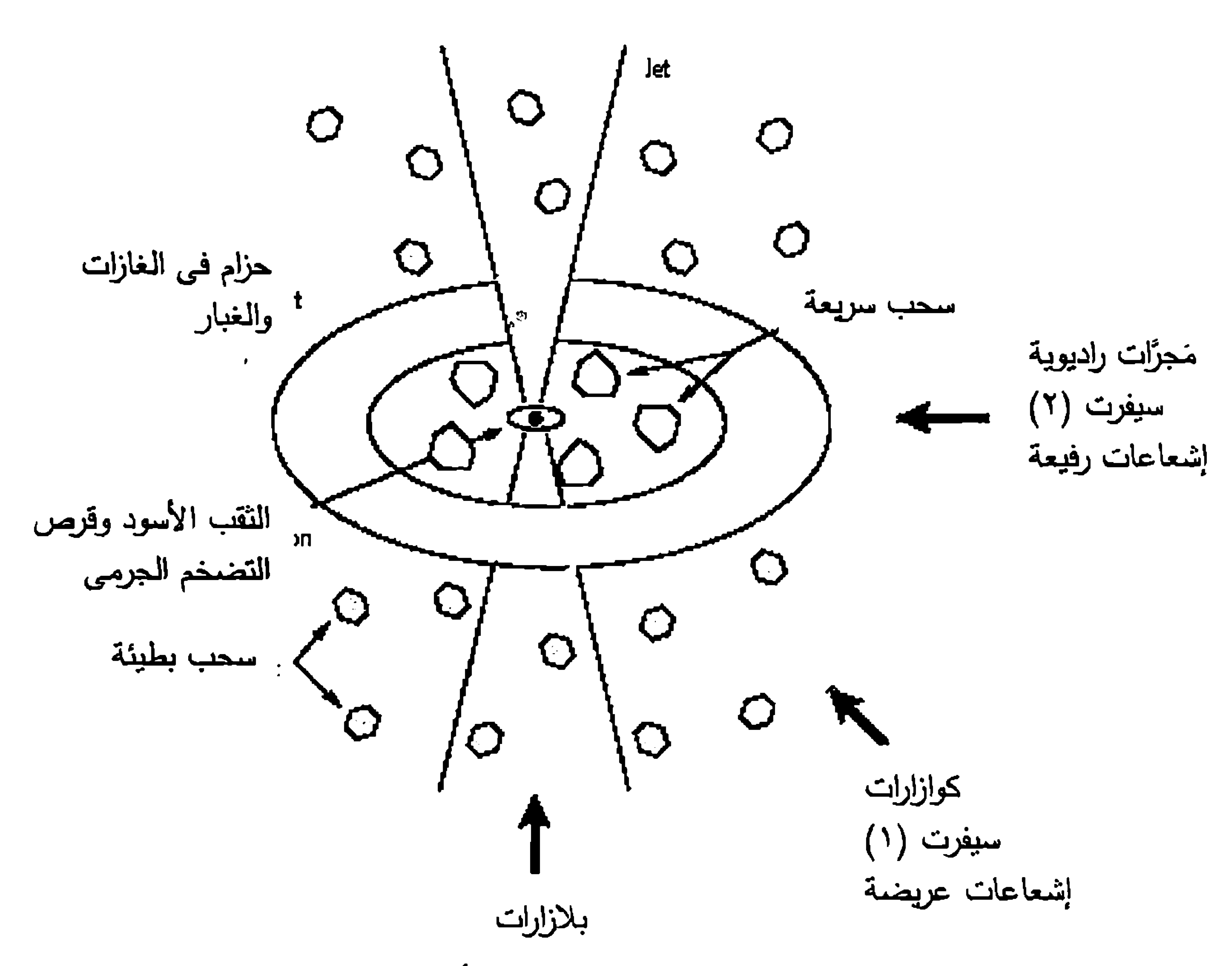
تَبِعات النموذج المُوحَّد

ها هى الأمور بالنسبة لبنية نواة المجرات النشطة فى النموذج الموحد. كيف تفسر هذه البنية مختلف الأنواع المرصودة؟ الأمر يتعلق ببساطة بإحدى تبعات وجود حزام معتم حول الثقب الأسود فائق الكتلة، وموقع الأرض بالنسبة لذلك الحزام.

عندما يكون مراقب على الأرض موجودًا فى مستوى حزام الغاز والغبار، لن يكون بوسعه رؤية إشعاع الأجزاء المركزية. إن النواة إذن تكون غير مرئية وتظهر فقط انبعاثات الجزيئات المشحونة بالطاقة والانبعاث السينكروتونى المصاحب لها، فيرى الراصد مجرة راديوية. وبالعكس لو كان الراصد موجودًا فى اتجاه محور الدوران، لرأى مصدرًا شبه محدد ودفقات للمادة موازية لخط الرؤية: أى سيرى بلازارًا.

أما فى الحالة الوسطى، فيمكن للمراقب أن يرى فى آنٍ واحد الجزء المركزى والدفقات. يتعلق الأمر فى هذه الحالة بكوازار أو مجرة سيفرت. والاختلاف بين هذين النوعين هو مسألة مقدار القوة. فمجرات سيفرت هى على الأرجح نسخ متواضعة من الكوازارات، حيث أن إنتاجها من الطاقة يقل مائة مرة عن حالة الكوازارات.

ويفسر النموذج الموحد كذلك وجه التباين بين نوعَىْ مجرات سيفرت. فبالنسبة للنوع الأول، تقع الأرض قرب الاتجاه العمودى على مستوى المنظومة، وهو ما يتيح رؤية النواة وكل السحب المحيطة بها بشكل مباشر. أما بالنسبة للنوع الثانى، فإن الأرض تقع قرب مستوى المجرة فلا يكون بوسعنا سوى رصد السحب البطيئة فى خارج الحزام. إن الفرق بين ضوى النواة يأتى إذن ببساطة من واقع أن تلك الأخيرة تكون إما مرئية أو متوارية.



النموذج الموحد للمَجرَّات النشطة، حيث يرتبط نوع الأجرام المرصودة بزاوية الرصد

وفيما يخص طابعَ الطيف، فمن السهل كذلك تفسير الأمور. بالنسبة للمجرات من النوع الأول، نحن نرى كل السحب، السريعة والبطيئة، وبالتالى نرى فى آنٍ واحد إشعاعات رفيعة وأخرى عريضة. وفى المقابل، بالنسبة للنوع الثانى، لا يكون بوسعنا أن نرصد سوى السحب الخارجية التى تدور ببطء والتى تكون خطوطها أرفع فى التحليل الطيفى.

ومن النقاط التى لا تزال بحاجة للتفسير هى لماذا تُصْدر بعض المجرات النشطة إشعاعات فى نطاق الراديو، دون البعض الآخر. ما العملية التى تمنع أحيانًا الإلكترونات من بث إشعاع سينكروترونى؟ لقد أظهرت عمليات الرصد أن البث الراديوى مرهون بنوع المجرات. توجد مصادر الراديو فى المجرات البيضوية فى حين أنْ الأخرى تتمركز فى المجرات الحلزونية، لكن الطبيعة الفيزيائية لهذا الربط لا زالت غامضة. فضلاً عن ذلك، فإن تأثير العوامل الأخرى، مثل خصائص الثقب الأسود المركزى، أو احتمالات التفاعل مع مجرات أخرى لا زال قيد دراسة عميقة.

الأدلة الرصدية

إن عمليات رصد مصادر أشعة إكس قد نقلت الثقوب السوداء النابعة من انهيار النجوم من المجال النظرى لمجال الحقيقة. لكن ماذا عن الثقوب السوداء فائقة الكتلة؟ هل ثمة دلائل رصدية على وجودها؟ وعلى غرار حالة بقايا النجوم، فلا شك أن العثور على دليل قاطع هو أمر مستحيل بسبب طبيعة الثقوب السوداء ذاتها. مع ذلك، يحاول الفلكيون الحصول على دليل غير مباشر، بالسعى إلى اكتشاف تأثير الثقب الأسود فائق الكتلة على البيئة المحيطة به.

لقد تمت المحاولات الأولى الناجحة فى هذا الاتجاه فى بداية التسعينيات. وأظهرت صور المناطق المركزية لبعض المجرات، لاسيما مجرة أندروميدا، أن عدد النجوم يزداد بشدة كلما اقتربنا من المركز. وكان تفسير ذلك بإرجاعه إلى وجود جرم شديد الاندماج، تشد جاذبيته النجوم وتعمل على تكثيفها. وكانت عمليات الرصد هذه هى الخطوة الأولى فى الاتجاه الصحيح، لكنها لم تكن كافية لتعزيز هذا التفسير ليكون مقنعًا بشكل كامل.

تأكيد وجود الثقوب السوداء فائقة الحجم

ولقد جاءت الطفرة الحقيقية فى عام ١٩٩٤ بفضل المرقب الفضائى هابل. كان الفلكيون فى هذا المرصد يدرسون المجرة (إم ٨٧) وهى مجرة

بيضوية عملاقة موجودة على بعد خمسة عشر ميجا فرسخ، ومعروفة منذ وقت بعيد بامتلاكها نواة نشطة ودفقات ضوئية. وبفضل دقته العالية، أى قدرته على رصد تفاصيل شديدة الدقة، فإن المرقب الفضائى استطاع رصد قرص الغاز المحيط بالثقب الأسود المركزى. وبالاستناد للتحليل الطيفى وتأثير دوبلر، نجح المرقب كذلك فى تأكيد مسألة دوران القرص، بل وكشفت عمليات الرصد أن سرعة دوران القرص كانت تزداد بشكل منتظم كلما اقتربت المسافة إلى المركز، وتبلغ قيمة ٥٥٠ كم فى الثانية عند ٢٠ فرسخًا من المركز.

انطلاقًا من هذه النتيجة، كان من الممكن تحديد كتلة الجسم المركزى. فى الواقع، كلما زادت السرعة، كان لا بد أن تزداد شدة الجاذبية وكتلة الجرم المركزى، ليتسنى معادلة تأثير قوة الطرد المركزى. وأظهر تطبيق ذلك المنهج أن الجسم المركزى لا بد أن يكون بنحو ٢,٤ مليار مثل كتلة الشمس. وفى الوقت نفسه، أظهرت عمليات الرصد أن هذه الكتلة الهائلة لا بد أن تكون متركزة فى حيز قليل إلى أقصى حد، كأن يماثل حجم المجموعة الشمسية. لقد كان من الواضح، فضلاً عن ذلك، أن عدد النجوم المرصودة فى المنطقة كان أقل بكثير من أن يكون سبب هذه الكتلة. لا بد إذن أنه كان هناك فى مركز (إم ٨٧) جسم صغير للغاية، فائق الكتلة إلى أقصى حد، وغير نجمى. كان الأمر يتعلق بالتحديد بالخصائص التى يمكن أن نتوقعها فى حالة وجود ثقب أسود فائق الكتلة. ومن ثَم كانت عمليات الرصد المذكورة تمثل حجة قوية لصالح وجود تلك الأجرام. من المؤكد أنها لم تكن تمثل دليلاً حقًا بما أن الجسم المركزى كان عصيًا على الرصد. لكن بالنسبة للفلكيين الذين قاموا بالرصد، فإن أطروحة الثقب الأسود كانت هى أقرب الحلول إلى المنطق، وكل التفسيرات الأخرى كانت تستوجب تخيل وجود جسم أكثر غرابة.

وجاء التأكيد الثانى فى العام نفسه، وكان هذه المرة بفضل عمليات رصد فى نطاق الراديو. كان الجرم الذى تتم دراسته هو (إن جى سى ٤٢٥٨) (NGC 4258) وهى مجرة حلزونية موجودة على بعد نحو سبعة ميجا فرسخ، وهى معروفة كذلك بأنها تطلق دفقات من المادة. كانت تلك المجرة قد رُصدت

بواسطة المرصد (VLBA)، وهو شبكة مكونة من عشرة هوائيات راديو موزعة على الأراضى الأمريكية، وتعمل بشكل متزامن لتقدم صورًا على درجة عالية من النقاء والدقة. وكان هدف الشبكة هنا أيضًا رصد قرص المادة الذى يدور حول الجسم المركزى. وفى المقابل، كانت عمليات الرصد تتركز على الإشعاع المكبر للقرص maser، وهو الإشعاع المكافئ لليزر فى موجات الراديو. وأظهرت عمليات الرصد أن سرعة الدوران كانت تزيد كذلك كلما قلت المسافة إلى المركز، ويمكن أن تصل لنحو ألف كيلومتر فى الثانية. وتبعث تلك المعطيات على تقدير كتلة الجسم المركزى بنحو أربعين مليون مثل كتلة الشمس، وكثافتها بنحو عشرة آلاف مرة أكبر من كثافة تجمع نجمى اعتيادى. وكان التفسير الأقرب إلى المنطق هنا أيضًا هو وجود ثقب أسود فائق الكتلة فى مركز مجرة (إن جى سى ٤٢٥٨).

اندماج المجرات

المجرات ذات النواة النشطة ليست هى الوحيدة التى تسترعى الانتباه. فبعض المجرات لها مواصفات خاصة بسبب تفاعلاتها مع مجرات أخرى. وسنرى لاحقًا إن أغلبية المجرات ليست معزولة فى الفضاء لكن تنتمى لتجمعات مَجرِّية. فى ظل هذه الظروف، فإن عمليات الشد الجذبوى التى تساعد على التقاء مجرتين هى ظاهرة عادية تتكرر كثيرًا. بهذا الشكل على سبيل المثال فإن المجرتين الأقرب من مجرتنا، وهما السحابتان الماجلانيتان، آخذتان فى السقوط عليها. ومن المتوقع أن تبتلعهما فى غضون بضعة مليارات من السنين. ومن المتوقع كذلك أن ينتهى الأمر بمجرة أندروميدا بالارتطام مع مجرتنا فى غضون أقل من عشرة مليارات من السنين.

وعلى عكس ما قد نتوقعه، لا يؤدى الارتطام بين مجرتين لكارثة كونية كبرى. ذلك أن احتمالية الالتقاء بين نجمين تبدو ضعيفة للغاية، وغالبًا ما تمر المجرات ببساطة عبر بعضها البعض. لكن إذا لم يكن هناك تأثير كبير على النجوم، فثمة تأثير على الشكل العام للمجرات. فمن شأن التفاعل الجذبوى أن

يؤدى إلى تولُّد قوى مَدّ كثيفة تعمل على اعوجاج المجرات؛ مما يسفر عن تغير كامل فى شكلها. فى هذا السياق، تفيد المحاكيات الرقمية لمثل هذه التداخلات أن النتائج يمكن أن تتجسد على سبيل المثال فى نشأة أذرع حلزونية فى هذه المجرة أو تلك. وفى بعض الحالات، إذا حدث اللقاء بين المجرتين بسرعة بطيئة نسبيًا، فإن المجرتين تفقدان استقلاليتهما وتتحولان لمجرة واحدة. إننا فى هذه الحالة نكون بصدد اندماج وليس اصطدامًا.

اندلاع موجات تكوُّن النجوم

وثمة ظاهرة ترتبط بالتحام المجرات وهى اندلاع موجات نشأة النجوم. لقد اكتشف القمر الصناعى إيراس عام ١٩٨٣ مصادر متعددة تتسم بإضاءة عالية فى نطاق الأشعة تحت الحمراء، وكل منها له قوة إجمالية تماثل قوة الكوازار. وأظهرت صور هذه الأجرام أن الأمر يتعلق بمجرات حلزونية فى حالة تداخل. وكان انبعاث الأشعة تحت الحمراء مصدره فى مركز هذه المجرات، لكن فى منطقة يبلغ حجمها ألف فرسخ، أى ما يزيد كثيرًا عنها فى المجرات ذات النواة النشطة.

وقد أتاحت الدراسات المتعمقة لهذه المجرات أن نفهم بشكل أفضل الظواهر المعنية. فالمناطق المركزية فى تلك المجرات هى فى واقع الأمر مهد يشهد نشأة كثيفة وسريعة للنجوم. تلك الأخيرة لا تكون مرئية لكونها لا تزال محاطة بسحب الجزيئات. غير أن الغبار فى هذه السحب يمتص الأشعة فوق البنفسجية للنجوم الشابة ويعيد إرسالها على هيئة أشعة تحت حمراء، وهى التى يرصدها إيراس. إن كتلة الغاز المحولة إلى نجوم وسرعة النشأة يبدوان أكبر كثيرًا مما يحدث فى مجرة مثل مجرتنا. بهذا الإيقاع فإن عملية اندلاع موجات نشأة النجوم لا يمكن أن تستغرق إلا عدة عشرات الملايين من السنين، وهو وقت قصير للغاية بالنظر لعمر المجرات.

وعلى الرغم من فهمنا بشكل عام لظاهرة اندلاع موجات تكون النجوم، فلازالت هذه الظاهرة تنطوى على كثير من التساؤلات، وبوجه خاص فيما يتعلق بأسبابها. الفرضية الأرجح هى أنه عند تداخل المجرات فإن قوى المَدِّ تؤدى إلى

تراكم كميات كبيرة من الغاز فى المناطق المركزية بإحدى المجرات، وتبدأ عملية انهيار جذبوى يقود إلى تكون النجوم. وهناك تساؤلات أخرى مهمة تكمن فى مسألة الصلة المحتملة بين ظاهرة اندلاع موجات تكوُّن النجوم ووجود نواة نشطة.

مجموعات المجرات والتجمعات المجرية

أحد المظاهر المهمة لعلماء الفلك المعنيين بالمجرات هو دراسة توزيع المجرات فى الكون. ومنذ عمليات الرصد الأولى للسُّدُم، لاحظ الفلكيون أن توزيع المجرات ليس متجانسًا على الإطلاق، بل على العكس، فإن المجرات لها ميل قوى لتشكيل تجمعات تتباين محتوياتها وأحجامها بشكل كبير. وتُصنف هذه التجمعات فى فئتين: فنحن نتحدث عن مجموعات إذا كان العدد الإجمالى للمجرات يقل عن مائة عضو ونتحدث عن تجمعات عندما يزيد عددها على ذلك الحد، على سبيل المثال، بالنسبة للتجمعات العملاقة التى قد تضم أكثر من عشرة آلاف مجرة.

ومجرة درب التبانة نفسها عضو فى مجموعة تضم ثلاثين مجرة نطلق عليها اسم المجموعة المحلية ويصل حجمها لمليون فرسخ. تسود فى تلك المجموعة مجرتان حلزونيتان كبيرتان؛ هما أندروميدا ومجرتنا، والمسافة بينهما تُقدر بنحو ٦٩٠ ألف فرسخ. وتتركز بشكل أو بآخر أغلبية المجرات الأخرى بالمجموعة المحلية حول هاتين المجرتين وهو ما يمنح المجموعة تكوينًا ثنائى القطب. ونجد بشكل خاص قرب درب التبانة السحابتين الماجلانيتين، وهما مجرتان غير منتظمتين تبعدان بالتوالى عن مجرتنا خمسين ألف وستين ألف فرسخ. ومن جانب أندروميدا تظهر مجرة ثالثة حلزونية هى مجرة المثلث على بعد ٧٢٠ ألف فرسخ منا. وفضلاً عن المجرات الخمس سالفة الذكر، نجد ما يربو على عشرين مجرة أقل كتلة، وبالتالى أصعب فى رصدها، وبوجه خاص نسبة كبيرة من المجرات البيضوية المتقزمة وبعض المجرات غير المنتظمة.

تجمعات المجرات

وبالابتعاد عن المجموعة المحلية، فإننا نقابل مجموعات أخرى من المجرات مثل تجمعنا ومنها مجموعات أكثر ازدحامًا قد تضم آلاف المجرات. والتجمع المَجرِّى الأقرب من المجموعة المحلية هو تجمع العذراء. وهو موجود على بعد عشرين ميجا فرسخ، ويضم أكثر من ألفَىْ مجرة مرئية من الأرض، من الأنواع كافة، ويبلغ قطره نحو اثنين ميجا فرسخ. والشكل النهائى للتجمع ليس محددًا ويوصف بأنه تجمع غير منتظم.

وتنطوى بعض التجمعات على توزيع أكثر اتساقًا، قد يكون على سبيل المثال كُرِّى الشكل، ونتحدث حينذاك عن تجمع مَجرِّى منتظم. وأقرب تجمع من هذا النوع من درب التبانة هو تجمع شعر برنيقة، ويقع على بعد مائة ميجا فرسخ. ويضم أكثر من ألف مجرة مرئية، وتكاد تكون كلها مجرات عَدَسيَّة أو بيضوية، وله قطر يبلغ نحو خمسة ميجا فرسخ. جدير بالذكر أن عدد المجرات الوارد هنا لا يضم سوى المجرات التى يتم رصدها من الأرض. ولا شك أن هذه التجمعات، على غرار المجموعة المحلية، تضم مجرات صغيرة غير منتظمة أو مجرات بيضوية متقزمة وتكون إضاءتها أقل من أن تسمح برصدها، لكنها موجودة فى الواقع وتزيد من كثافة التجمعات التى تضمها لتصل بالعدد إلى عدة آلاف بل وقد يربو على عشرة آلاف عضو.

ثمة نقطة مشتركة أخرى بين تلك التجمعات، وهى وجود مجرات بيضوية عملاقة فى مركزها، ثلاثة فى تجمع العذراء واثنتين فى شعر برنيقة. إن هذه المجرات هى ثمرة ما نسميه بالتوحش المجرى. فى الحقيقة، تدور حول هذه العمالقة مجرات اعتيادية. وحين تقترب واحدة منها بشدة من المجرة المركزية، فإنها لا تستطيع الفرار من الشد الجذبوى، فتلتهمها المجرة العملاقة. وهكذا تتراكم المادة شيئًا فشيئًا مع الوقت فى المجرات المركزية حتى ينتهى بها المطاف للوصول إلى أحجام خارقة.

يأتى جزء من معرفتنا بتجمعات المجرات من عمليات الرصد فى نطاق أشعة إكس. فقد أوضحت هذه العمليات وجود كميات كبيرة من الغاز فى

درجات حرارة تبلغ مائة مليون كلفين. ويرتبط ذلك الغاز فى التجمعات غير المنتظمة بالمجرات، فى حين أنه يملأ كل التجمع، فى حالة التجمعات المنتظمة. يُظهر ذلك أن التجمعات المنتظمة كانت محلاً للعديد من التفاعلات بين المجرات؛ الأمر الذى أدى إلى تشتت الغاز شيئًا فشيئًا لينتهى به الأمر إلى هذا التوزيع المتجانس. وفى الأحوال كافة، يكون انبعاث أشعة إكس مصحوبًا بفقْد للطاقة بالنسبة للغاز، وهو ما يسفر عن سقوط ذلك الغاز نحو مركز التجمع، ومولد ما نطلق عليه اسم التيارات الغازية الساخنة. ويكون من شأن هذه التدفقات الغازية أن تولّد سحبًا هيدروجينية تؤدى لنشأة نجوم قليلة الكتلة؛ لتسهم بشكل فعّال فى زيادة كتلة المجرات المركزية العملاقة.

التجمعات المَجرّية الفائقة والتكوينات على المستوى الأضخم

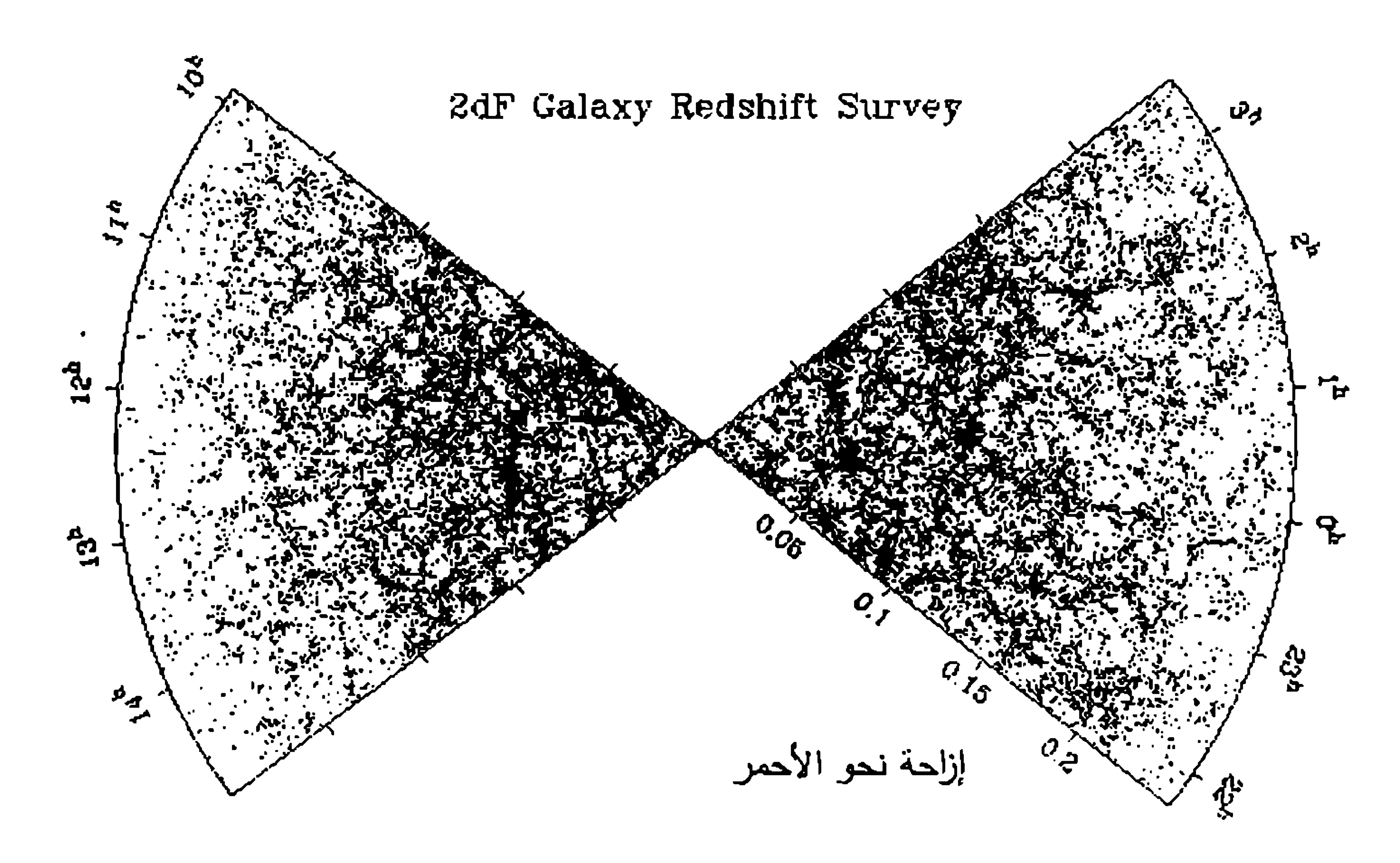
تميل المجرات للعيش فى مجموعات وليس فى عزلة. لكن ماذا يحدث على المستوى الأكبر؟ كيف تتوزع مجموعات المجرات والتجمعات المجرّية؟

التجمعات الفائقة

لقد أظهرت، هنا أيضًا، عمليات الرصد أن توزيع المجرات بعيد عن أن يكون منتظمًا. فمجموعات المجرات والتجمعات المجرية لها ميل للتجمع لتشكل ما نطلق عليه التجمعات الفائقة، وهى تجمعات عملاقة تصل فى المتوسط لحجم خمسين ميجا فرسخ، وتضم عدة مئات من المجموعات والتجمعات المجرية. تنتمى المجموعة المحلية بهذا الشكل لتجمع محلى فائق مركزه يوجد فى مستوى تجمع العذراء. ويمكننا كذلك أن نذكر نماذج أخرى مثل التجمع الفائق هيدرا قنطورس أو تجمع شابلى الفائق الموجود على بعد ٢٠٠ ميجا فرسخ منا.

إن مستوى التجمع المجرى الفائق هو نقطة الانطلاق التى يبدأ عندها الإحساس بتمدد الكون. ففى الواقع، عندما تكون مجموعة من الأجسام مرتبطة ببعضها بقوة جاذبية متبادلة، لا تكون فى حالة تمدد ما دامت الجاذبية المتبادلة

بين الأجسام كبيرة بما يكفى لمقاومة التمدد. وينطبق ذلك على حالة المجرة أو المجموعة المحلية أو التجمعات الأخرى. فى المقابل، لا تكون قوة الجاذبية التى تربط بين التجمعات المجرية قوية بما يكفى لتحول دون الإفلات، وعند هذا المستوى يبدأ التمدد فى أن يكون ملموسًا. وتكون نتيجة ذلك أن التجمعات تتباعد ببطء عن بعضها البعض ويزداد حجم التجمعات الفائقة مع الوقت.



رؤية للتكوين الكونى على المستوى الأضخم تم الحصول عليها عام ٢٠٠١. تضم تلك الصورة ٥٨٦٠٦ مجرة فى شريحة مقطعية للكون تتكون بسُمك ٤ درجات. تأتى المعطيات فى المشروع الكارتوجرافى 2df Galaxy Redshift survey الذى قدمه المرصد الأنجلو - أسترالى بأستراليا.

يمكننا بوضوح رؤية تراكزات المجرات فى تجمعات وتجمعات فائقة والخطوط التى توصل بين تلك التجمعات الفائقة، وأيضًا الفراغات الكبرى ذات العدد القليل فى السكان الموجودة فى هيئة فقاعات.

البنية على المستوى الأضخم

لقد تم الحصول على النتائج الأولى حول انتظام المادة فى التجمعات الفائقة ببساطة عن طريق دراسة توزيع التجمعات فى السماء. ولم تكن هذه

النتائج مُرْضية بشكل كامل لأن العوامل المؤثرة على الإسقاط يمكن أن تتدخل وتفسدها. ففي الواقع، يمكن لتجمعين حتى لو كانا منفصلين إلى أقصى حد أن يبدوا قريبين من بعضهما البعض برؤيتهما من الأرض لو كانا موجودين في نفس الاتجاه. ولمعرفة التوزيع الحقيقي للتجمعات في الفضاء، كان ينبغي الحصول على معلومات أكبر عن بُعْد تلك التجمعات. وبتلك المعلومة، صار من الممكن تحديد ما إذا كان تجمعان قريبان في السماء هما بالفعل قريبان في الحقيقة في الفضاء، أم إن الأمر يتعلق بمجرد تأثير الإسقاط.

ويستند المنهج المستخدم في تحديد مسافة تلك الأجسام البعيدة على قانون هابل. ينبغي بداية القيام بتحليل طيفي لضوء الجرم وتحديد إزاحته صوب الطيف الأحمر ثم استنباط سرعة تراجعه منها. بعد ذلك، وانطلاقًا من قانون هابل، تستخدم هذه السرعة في حساب مدى بعد الجرم. إن الأمر بهذه الطريقة يبدو بسيطًا للغاية من الناحية النظرية، لكن عمليًا فإن الأمور تكون أكثر تعقيدًا لأن المجرات البعيدة لا تبعث إلا قليلا جدا من الضوء. إن الحصول على تحليل طيفي جيد يُعتدُّ به هو بالتالي مسألة تستغرق وقتًا طويلاً وتنطوي على صعوبة كبيرة. إن الأمر هنا يتعلق بالمشكلة الكبرى التي تواجه علم الفلك فوق المَجرِّي؛ وتمثل عقبة شديدة الصعوبة.

لكن بفضل التقدم في تقنيات الرصد، جاءت النتائج الأولى في الثمانينيات وكشفت حينذاك عن توزيع المجرات في مستويات أكبر من مائة ميجا فرسخ وهو ما نسميه البنية المجرية الفائقة. وبناء على ذلك كشف الفلكيون أنه حتى على هذا المستوى فإن توزيع المادة غير متجانس. فثمة فراغات هائلة في توزيع التجمعات الفائقة، وهي فقاعات عملاقة حجمها يناهز مائة ميجا فرسخ ولا تضم أية مجرات. ويرى الفيزيائيون الفلكيون حاليًا أن تلك الفراغات تمثل أكثر من ٩٠٪ من حجم الكون. وإن التجمعات الفائقة للمجرات موجودة على الحدود بين هذه الفراغات. وأظهرت عمليات الرصد أن تلك التجمعات تنتظم لتشكل تكوينات على هيئة خيوط ترسم حدود الفقاعات.

وأوضحت عمليات الرصد كذلك وجود بنية مستوية عملاقة تدعى الحائط العظيم موجودة على بعد مائة ميجا فرسخ من المجموعة المحلية. وهذا الجدار شاسع وتبلغ مساحته نحو ٨٠ فى ٢٣٠ ميجا فرسخ وهو رفيع للغاية؛ حيث إن سمكه لا يزيد على عشرةِ ميجا فرسخ. وفى نهاية الثمانينيات، اكتشف الفلكيون كذلك أن التجمع المحلى الفائق ليس ثابتًا، لكنه يتحرك فى اتجاه كوكبة قنطورس. ويُعزى ذلك التحرك إلى الشد الجذبوى الخارق لمجموعة جديدة تُعرف باسم الجاذب الأعظم، تصل كتلته إلى عشرات الآلاف مثل كتلة المجرات وحجمه يصل لنحو مائة ميجا فرسخ..

تُظهر كل تلك الاكتشافات الحديثة أن البنية المجرِّية الفائقة تفوق كثيرًا فى تعقيدها كل الحدود التى كنا نتخيلها حتى اليوم. وتشكل أسباب عدم التجانس وتشكيل تلك التكوينات جانبًا من المعضلات الكبرى التى تواجه الفيزياء الفلكية المعاصرة. وفى إطار السعى إلى التغلب على هذه المشكلات وتطوير معرفتنا بالتكوين المجرى الفائق، ثمة مشروعات متعددة، فى مجالات تقنيات ومعدات الرصد، جارية وتستهدف حشودًا أكثر ازدحامًا بالمجرات وشديدة البعد.

كرونولوچيا تاريخية لعلم الفلك

٢٨٠ ق. م.: أريستارخوس الساموسى يفترض أن الأرض تدور حول الشمس ويحدد أول تقدير للمسافة بين الأرض والشمس.

١٣٠ ق. م.: هيباركوس يضع أول تصنيف للنجوم اللامعة.

١٤٠ : بطليموس يطرح نموذج مركزية الأرض فى الكون.

٨٢٥ : الخوارزمى مبتكر الجبر ينشر أول الجداول الفلكية ببغداد.

٨٢٩ : الخليفة المأمون ينشئ مرصد بغداد.

١٠٥٤ : فلكيون صينيون يرصدون نجمًا سوبرنوفا.

١٥٤٣: كوبرنيكوس ينشر كتابه فى ثورات الأجرام السماوية ليعلن مركزية الشمس فى المجموعة الشمسية.

١٥٧٢: تايكو براه يرصد سوبرنوفا ويضع نهاية لمفهوم السماء الثابتة.

١٥٧٧: تايكو براه يرصد مُذنَّبًا ليؤكد على فكرة حركة الكون.

١٦٠٩: كبلر يحدد أول قانونين لحركة الكواكب حول الشمس.

١٦١٠: جاليليو يستخدم النظارة المعظمة للمرة الأولى فى تاريخ البشرية لرصد أجرام المجموعة الشمسية.

١٦١٩: كبلر ينشر قانونه الثالث عن حركة الكواكب.

١٦٧١: إسحاق نيوتن يصنع المرقب العاكس الأول فى تاريخ البشرية.

١٦٨٧: إسحاق نيوتن ينشر نظريته عن الجاذبية الكونية.

تعريف المؤلف

د. أوليڤييه اسلانجيه

- فيزيائى فلكى فرنسى من مواليد ١٩٧٠.
- ولد فى مدينة (بار) فى (الساس) وأمضى شبابه فى (سيلستا).
- درس الفيزياء فى جامعة ستراسبورج وتخرج فى ١٩٩٢.
- درس الفيزياء الفلكية وتقنيات علوم الفضاء (دراسات متقدمة) جامعة باريس وفى مرصد باريس (١٩٩٤).
- أمضى ثلاث سنوات فى قسم الفيزياء والفلك، جامعة بلاد الغال فى كارديف وحصل على درجة الدكتوراه فى الفيزياء الفلكية عام ١٩٩٧.

تعريف المترجم

طارق كامل

- مترجم مصرى وفنان تشكيلى من القاهرة.
- درس الصحافة مع الفرنسيين بكلية الإعلام جامعة القاهرة، وحصل على دبلوم الصحافة من جامعة باريس ومعهد تأهيل الصحفيين بباريس (عام ٢٠٠٣) فى إطار شراكة بين الاتحاد الأوروبى وجامعة القاهرة.
- حصل على ليسانس الترجمة والأدب الفرنسى (٢٠١٤) من جامعة القاهرة، مركز التعليم المفتوح.
- نشرت له أكثر من خمسة كتب بين السياسة والترجمة العلمية؛ منها كتاب (العالم لنا نحو عولمة بديلة مناهضة للعولمة الليبرالية) (الهيئة العامة للكتاب، مكتبة الأسرة ٢٠٠٦)، ونظريات السماء العثور على الزمن المفقود وضياع المكان (طبعة محدودة)، كما صدرت له رواية قصيرة (طبعة محدودة).
- أقام ما يزيد على عشرين من معارض الفن التشكيلى بين المائيات والتصوير الزيتى والفوتوغرافيا، وله العديد من المقتنيات لدى أفراد فى مصر وفرنسا.
- عضو فى أتيلييه القاهرة ـ جماعة الكُتّاب والفنانين، وعضو سابق فى الجمعية المصرية للرصد الفلكى بكلية العلوم جامعة القاهرة قبل حلها.
- ساهم فى تحرير كراسات آخر النهر ورحلة ليل العلمية بين علم الكونيات والفلك والترجمة العلمية (٢٠١٠ - ٢٠١٤) مع أ.د. أحمد الأهوانى أستاذ الهندسة الكيميائية بجامعة القاهرة.



مَرْصَد(ESO) المَرْصَد الأوروبى الجنوبى فى (سيلا) فى (شيلى)، ويضم بوجه الخصوص المِرْقَب الذى يبلغ قطره (٣,٦) مترًا أعلى الصورة إلى اليسار. انظر [المِرْقَب الكاسر والمِرْقَب العاكس]



المراصد الموجودة على قِمَّة بركان (مونا كيا) فى جزيرة (هاواى)، والمراصد الستة الرئيسة هى من اليسار إلى اليمين: [JCMT, Subaru, Keck 1, Keck 2, CFHT ,Gemini.]. انظر [المِرْقَب الكاسر والمِرْقَب العاكس]



المِرْقب الفضائى هابل.
انظر [النقاء الزَّاوِىّ المرتفع]



المِرْقَب الرَّاديوِىّ فى (باركس) فى (أستراليا) بقُطْر ٦٤ مترًا. انظر [علم الفلك الرَّاديوىّ]



الشبكة فائقة الاتساع VLA فى (نيو مكسيكو)، وتتكون من ٢٧ هوائيًّا بقطر ٢٥ مترًا. انظر [علم الفلك الرَّاديوىّ]

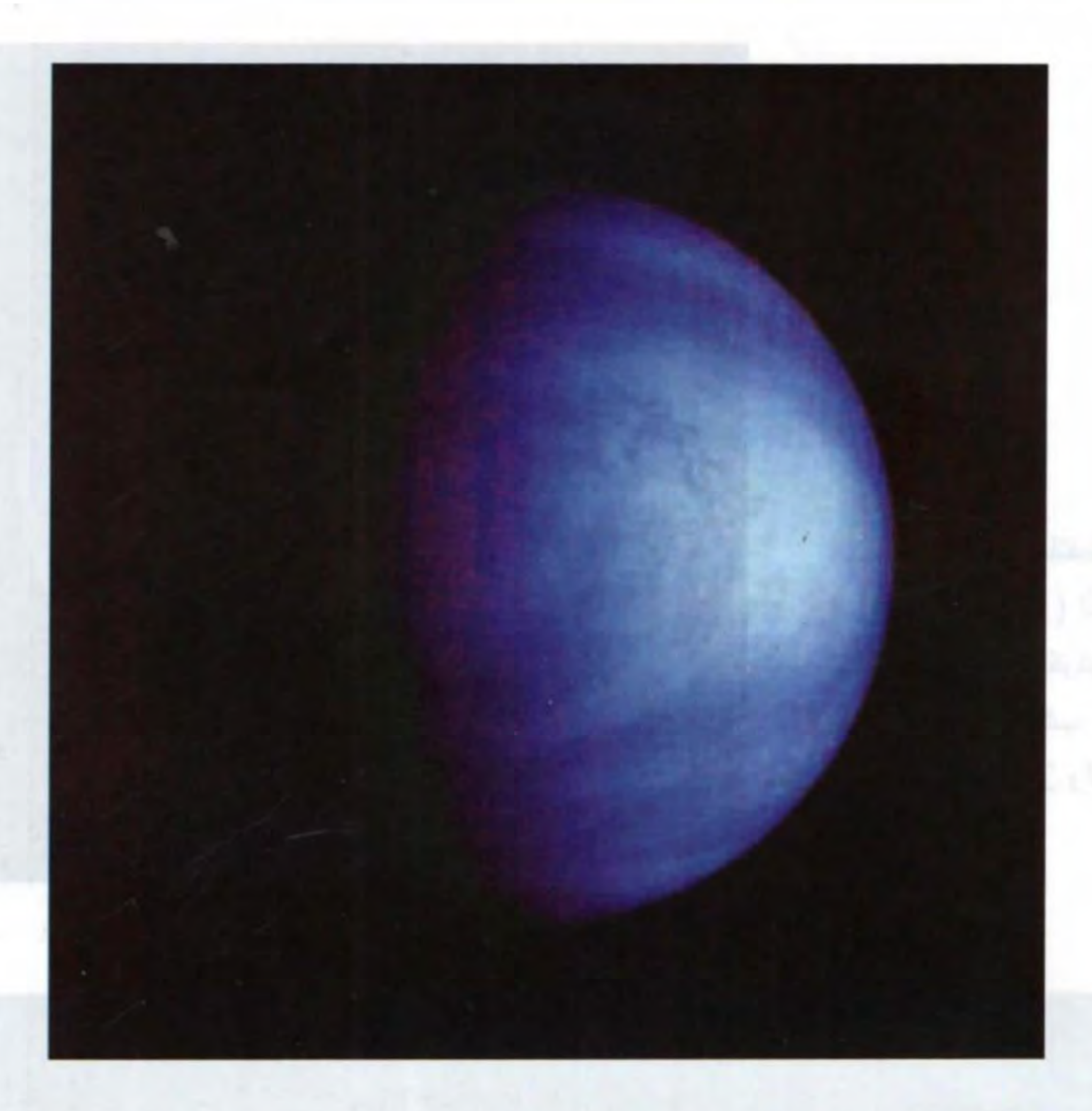


بيان للطريقة التى يمكن أن تتكامل بها عمليات رصد مختلف الأطوال الموجية. هذه صورة للتجمُّع المَجَرِىّ (MS 0735,6+7421)، وهى تركيب من ثلاث صور التقطها المِرْقَب الفضائىّ (هابل) فى المجال المرئىّ (باللون الأخضر)، وبالمَرْصَد (شاندرا) الخاص بأشعَّة (إكس) باللون الأزرق وشبكة (VLA) بالأحمر. وعلى حين لا تظهر الصورة فى المجال المرئىّ سوى مَجرَّات، فإن أشعة (إكس) تبين هالات الغاز الساخن بالتجمُّع المَجَرِىّ. أما موجات الراديو؛ فهى تبين انبعاثات لجُسَيْمات مشحونة بالطاقة تنبعث من الثقب الأسود المركزىّ فائق الكتلة، وتصنع تجاويف فى هالات الغاز. انظر [الأطوال الموجيَّة الأخرى]

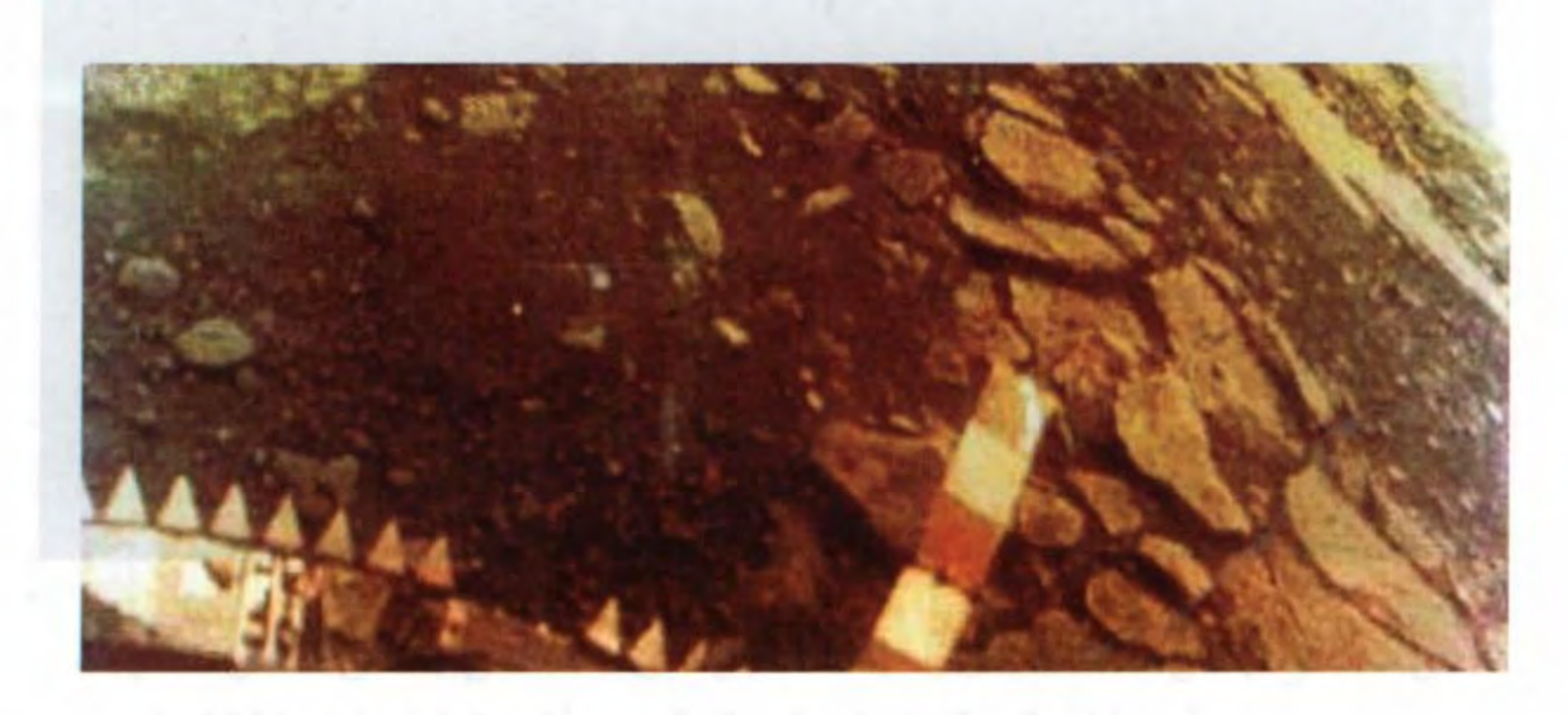


مختلف مراحل نشأة المجموعة الشمسية: انكماش سحابة من (الهيدروجين) و(الهليوم)، يليه تسطُّح هذه المنظومة، ثم نشأة التكوينات الأوَّلية للكواكب، ثم اندلاع التفاعلات النوويَّة فى المركز لتصل فى نهاية المطاف إلى المجموعة الشمسيَّة بشكلها الحالىّ. انظر [نشأة المجموعة الشمسية]

صورة لكوكب عُطَارد مُلتقطَة من المَرْكَبة (مسنجر) فى عام ٢٠٠٨. انظر [عطارد.. ذلك العالم الغامض]



صورة لكوكب الزُّهَرة ملتقطة فى عام ١٩٩٠ من المركبة (جاليليو)، وتم تلوين الصورة لإظهار بعض التفاصيل وللتنويه عن اللون البَنَفْسجيّ للمُرشِّح المستخدم. ويمكن ملاحظة العديد من التفاصيل فى سحابة الحَمْض الكبريتى التى تغطى الكوكب. انظر [كوكب الزُّهَرة]



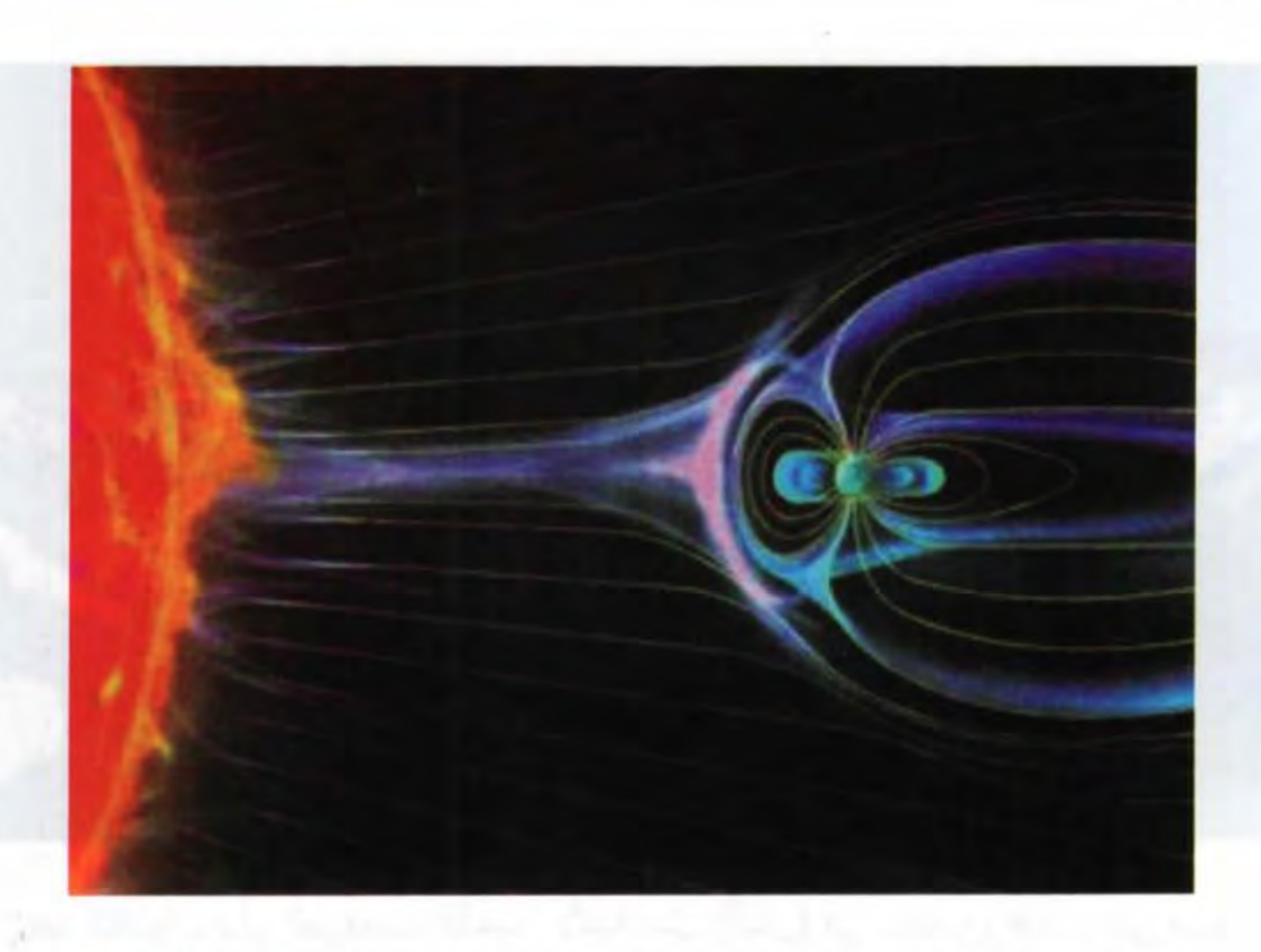
سطح الزُّهَرة كما صوَّرته المركبة السوفييتية (فينيرا ١٣) عام ١٩٨٢. انظر [كوكب الزُّهَرة]



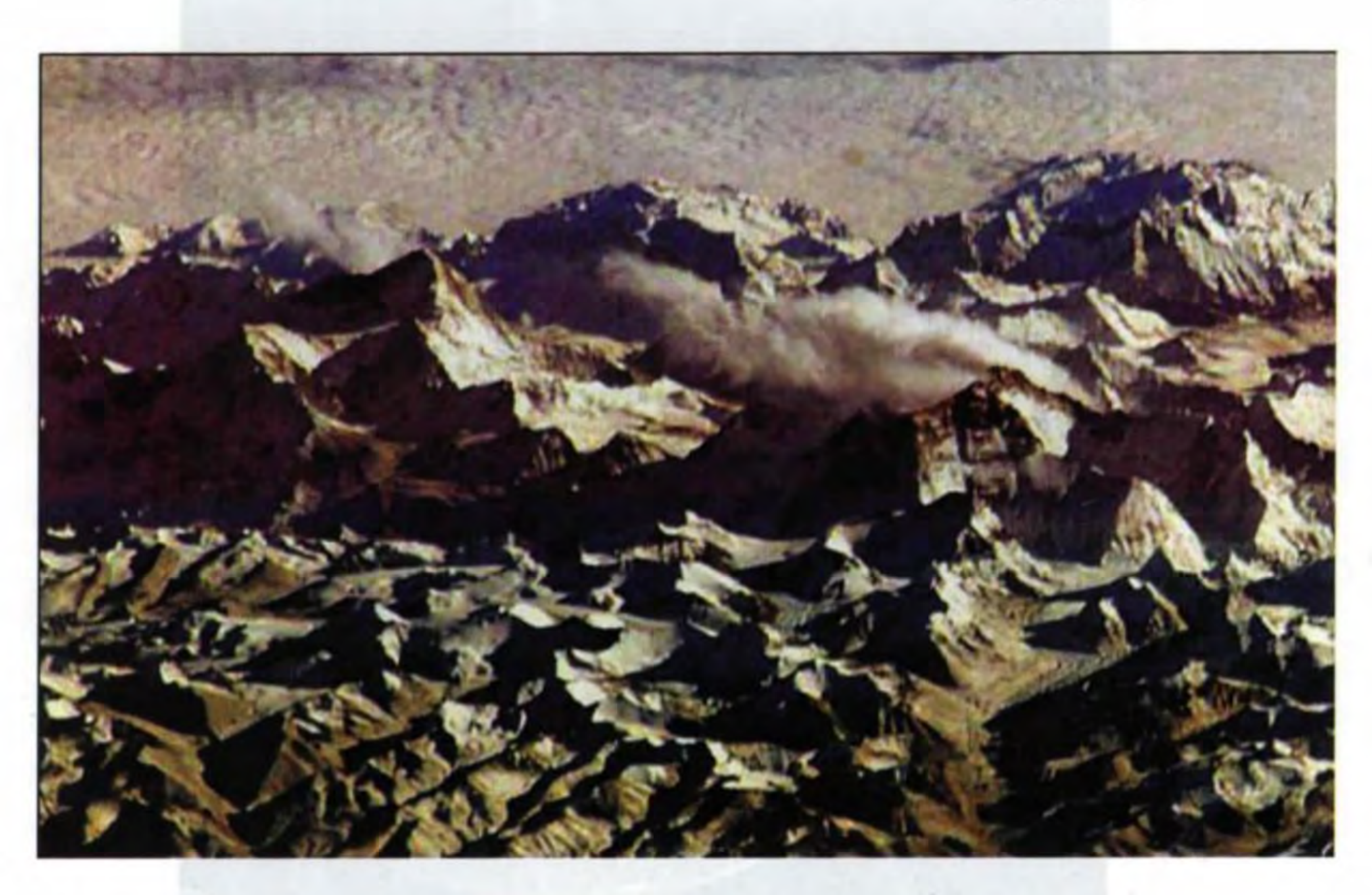
صورة للأرض ملتقطة من المركبة (جاليليو) إبَّانَ أول تحليق لها فوق كوكبنا عام ١٩٩٠. انظر [كوكب الأرض- الغلاف الجَوِىّ والغلاف المِغْناطِيسِىّ]



صورة الشَّفَق القُطْبىّ الجنوبىّ ملتقطة من المركبة الفضائية إبَّانَ الحد الأقصى للتوهُّج الشمسى فى عام ١٩٩١. انظر [كوكب الأرض ـ الغلاف الجَوِىّ والغلاف المِغْناطِيسِىّ]



صورة تخيُّليَّة لفنان للتفاعل بين الرياح الشمسية والغلاف المِغْناطِيسِىّ للأرض. (نِسَب الأبعاد غير مطبقة). انظر [كوكب الأرض الغلاف الجَوِىّ والغلاف المِغْناطِيسِىّ]



قِمَم (إفرست) إلى اليمين و(ماكالو) إلى اليسار حسبما يراها المرء من المحطة الفضائية الدولية، وهى تُعدُّ من أبرز مظاهر الصفائح التَّكْتُونِيَّة فى جبال(الهيمالايا). انظر [كوكب الأرض - التكوين الداخلى والألواح التَّكْتُونِيَّة]



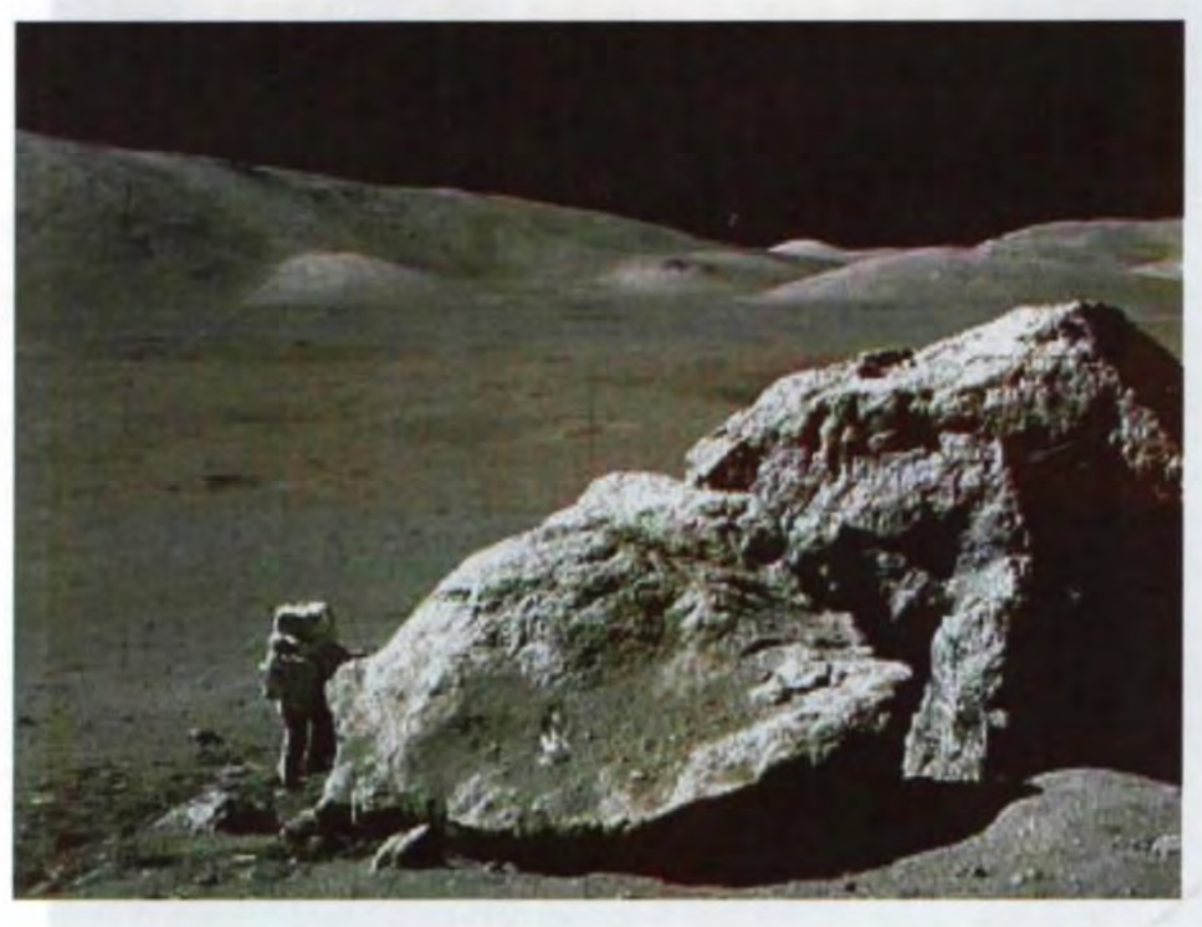
تفيد التقديرات بأن المرتفعات الثلجية الألبية مثل (ألِتْش) فى سويسرا، فقدت على مدى المائة والخمسين سنة الماضية نحو نصف حجمها في المتوسط. انظر [كوكب الأرض- الاحتباس الحرارى]



صورة مركبة من مجموعة من الصور للقمر ملتقطة بواسطة المركبة (جاليليو) عام ١٩٩٢. انظر [قمر الأرض]



الإنسان على القمر فى ٢٠ يوليو ١٩٦٩، صورة (لأدوين ألدران) التقطها (نيل أرمسترونج) الذى يمكننا ملاحظة ظِلّه.
انظر [استكشاف القمر]



[رائد الفضاء والجيولوجىّ (هاريسون سميث) إبَّانَ بعثة (أبوللو ١٧) عام ١٩٧٢. انظر [سطح القمر]



صـــورة تجمـــع الأرض والقمـر ملتقطـة بالمركبـة (جـاليليو) عـام ١٩٩٠ مـن مسـافة سـتة ملايـين كيلـومتر. انظـر [نشـأة القمر]

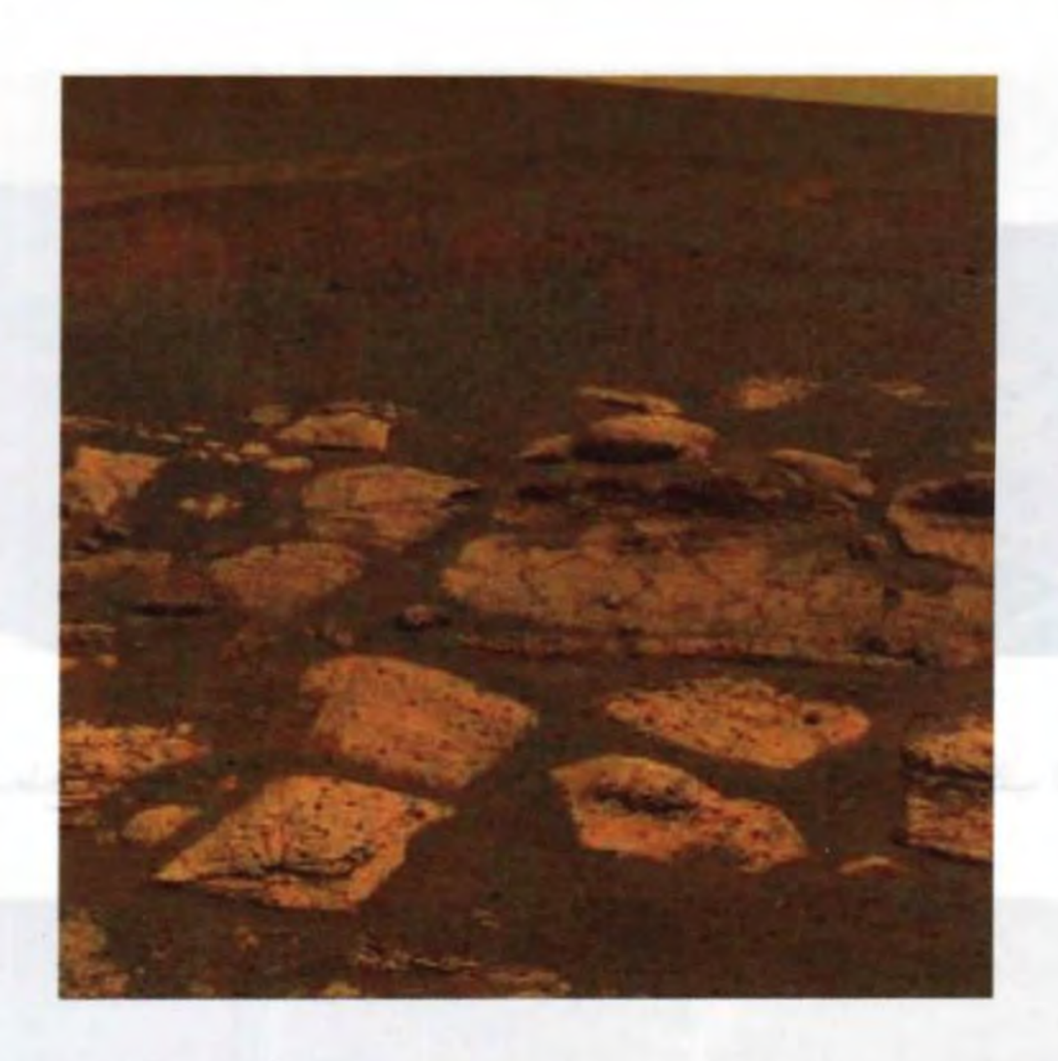


صـورة مُركَّبـة للمِرِّيخ مكونـة من مائـة واثنتين صـورة، ملتقطـة إبَّـانَ بعثـات (ڤـايكينج) والصـورة مُركَّزة علـى منطقـة وادى (مـارينرى)، وهو سلسلة من الخوانق بامتداد ثلاثـة آلاف كيلومتر وبعمق يبلـغ أقصاه ثمانيـة كيلومترات، ونلحظ إلى اليسار براكين (تارسيس) بارتفاع نحو خمسةٍ وعشرين كيلومترًا. انظر [كوكب المِرِّيخ]



بانوراما لسطح المِرِّيخ ملتقطة إبَّانَ بعثة (باثفايندر) عام١٩٩٧. انظر [كوكب المِرِّيخ]

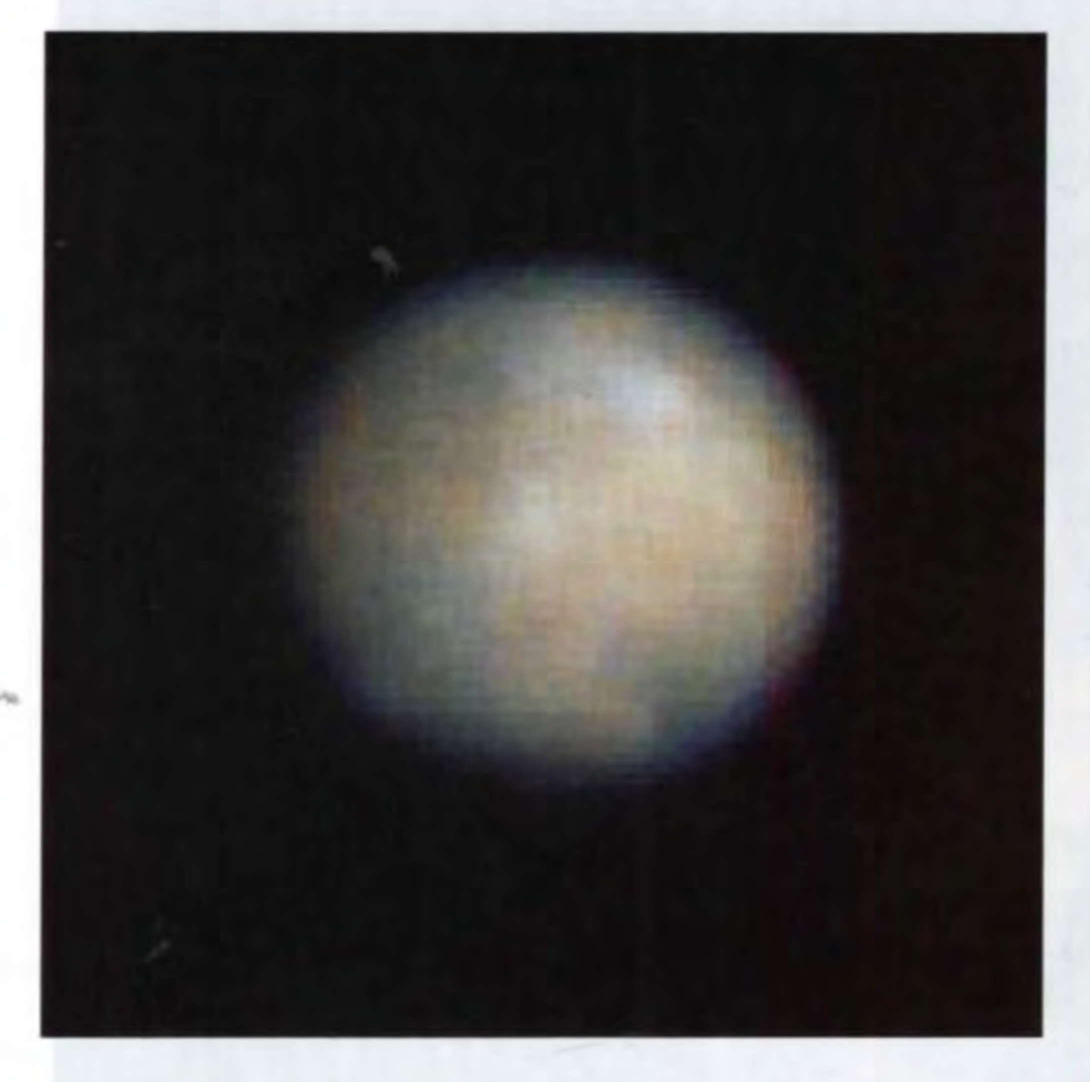
صورة لحوض (هيلا) على كوكب المِرِّيخ ملتقطة بأداة التصوير HRSC بالمركبة الأوروبية (مَارْس إكسبريس). ويمكننا تبيُّن قناة اسمها (رويال ڤاليس)، وهي على الأرجح نتاج تدفقات مائية منذ مليارات السنين. انظر [المياه على المِرِّيخ]



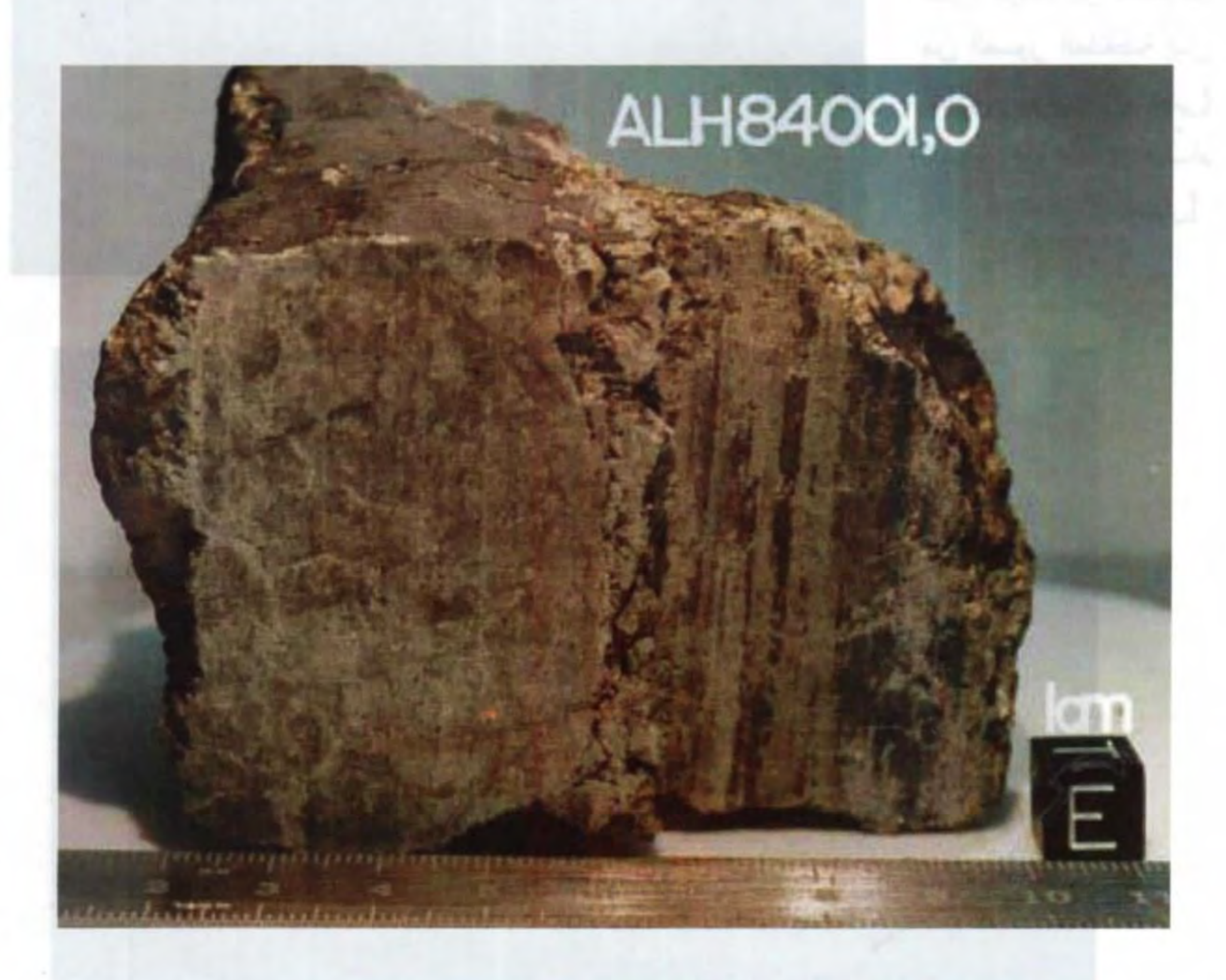
صـورة التقطهـا (المَكُّـوك الفضـائىّ) الأمريكـىّ (أُوبرتينتـى) لبـروزٍ صخرىّ على المِرِّيخ. انظر [المياه على المِرِّيخ]



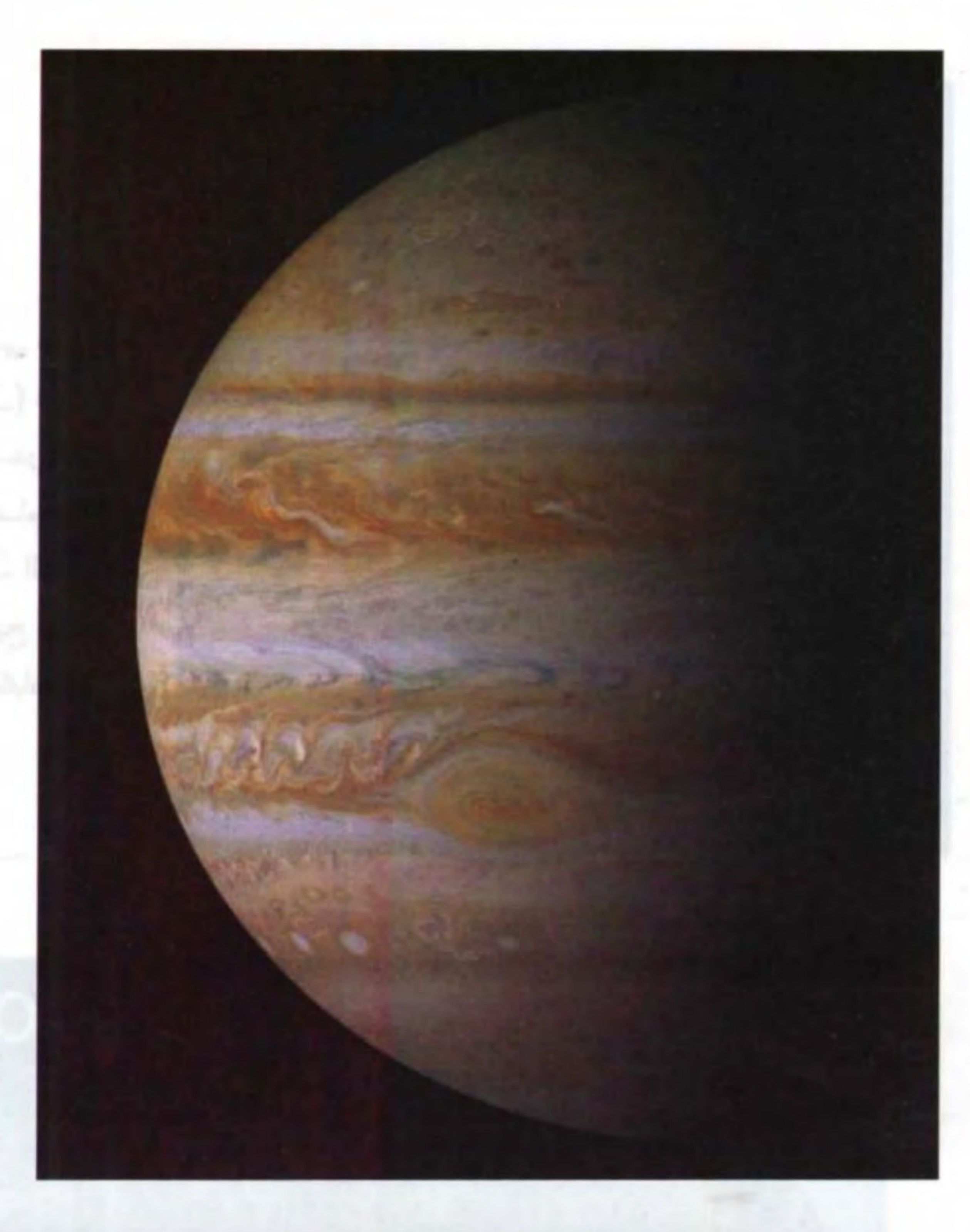
الكويكب (إيدا) وتابعه (داكتيل) وتم تصويره في عام ١٩٩٤ من المركبة (جاليليو) من مسافة عشرةِ آلافٍ وثمانمائةٍ وسبعين كيلومترًا. و(إيدا) – على اليسار – هو واحد من حزام الكُوَيْكبات بين المِرِّيخ والمُشْترى. وطوله ستة وخمسون كيلومترًا؛ فى حين يبلغ طول (داكتيل) كيلومترًا ونصف الكليومتر. انظر [الكويكبات]



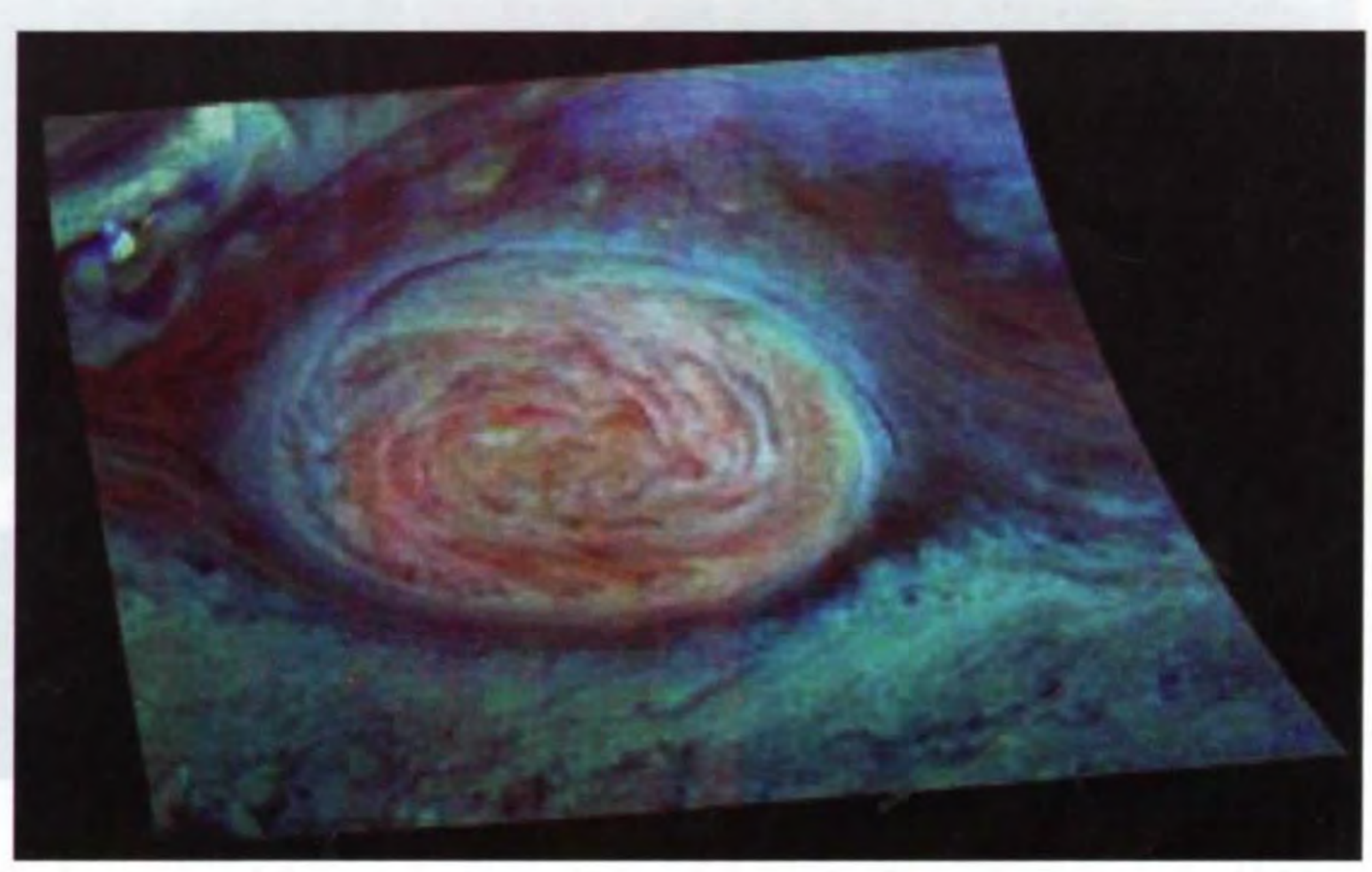
الكوكب المُتقزِّم (سيريس) على نحو ما رصده المِرْقَب الفضائىّ (هابل) فى عام ٢٠٠٤، وكان (سيريس) مندرجًا فى تصنيف الكويكبات حتى عام ٢٠٠٦ حيث تم نقله إلى مصافّ الكواكب المتقزمة؛ لكبر كتلته بدرجة تتيح لجاذبيَّته منحه شكلًا كُرَيًّا.. انظر [الكويكبات]



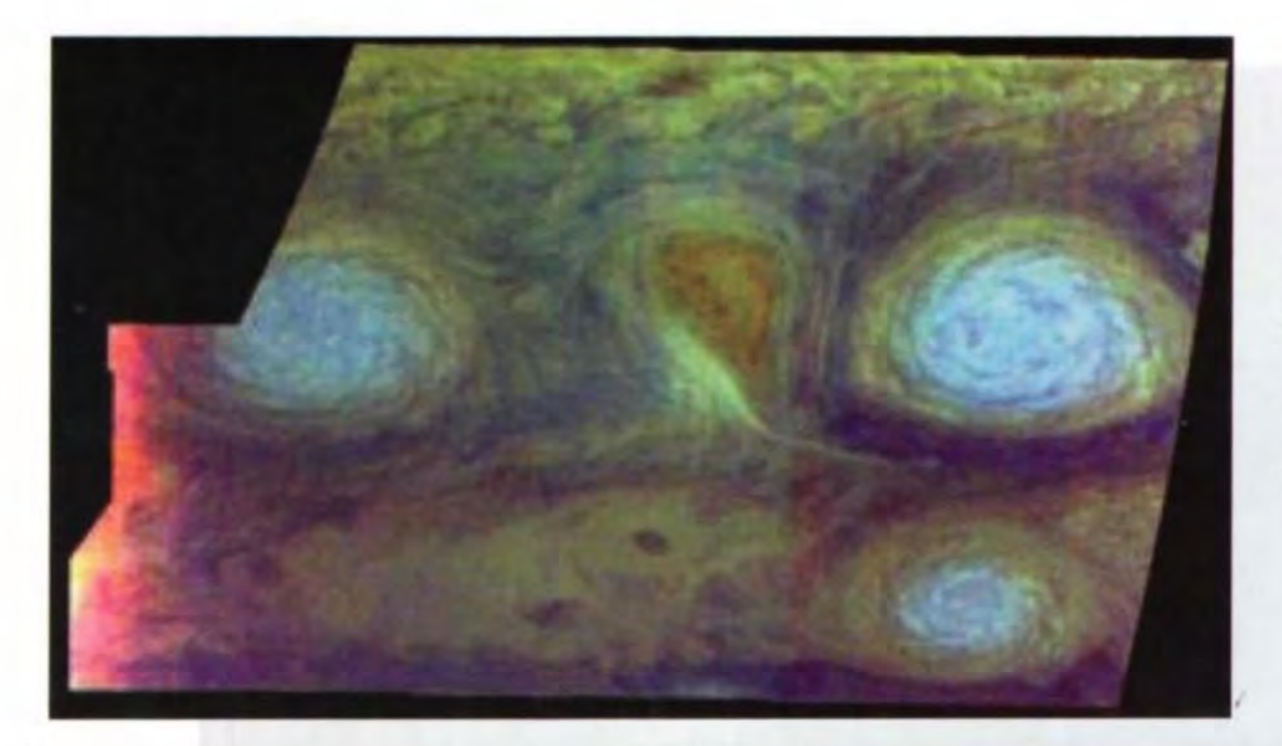
النَّيْزَك (ALH 84001) الذى يتميز بانتمائه لكوكب المرِّيخ، وقد اكتسب شهرته فى عام ١٩٩٦ عندما أعلن فريق أمريكىّ اكتشاف آثار محتملة لحفريَّات لعضويات حيَّة فيه. انظر [النيازك]



صورة مركبة من مجموعة من الصور الملتقطة إبَّانَ تحليق المركبة (كاسينى) فوق المُشْترِى عام ٢٠٠٠. انظر [المُشْترِى]



صورة بألوان غير حقيقية للبقعة الحمراء الكبرى فى كوكب المُشْترِى التقطتها المركبة (جاليليو) فى مجال الأشعة تحت الحمراء عام ١٩٩٦. انظر [المُشْترِى]



صورة مركبة من مجموعة من الصور بألوان غير حقيقية لعدة بقع بيضاء بيضويَّة الشكل على المُشْترِى التقطتها المركبة (جاليليو) عام ١٩٩٧. انظر [المُشْترِى]



صورة مركبة للأقمار الأربعة التى اكتشفها (جاليليو) لكوكب المُشْترِى مُرتَّبة حسب حجمها: (چانيميد) ثم (كاليستو) ثم (إيو) و(أوروبا). انظر [توابع المُشْترِى]

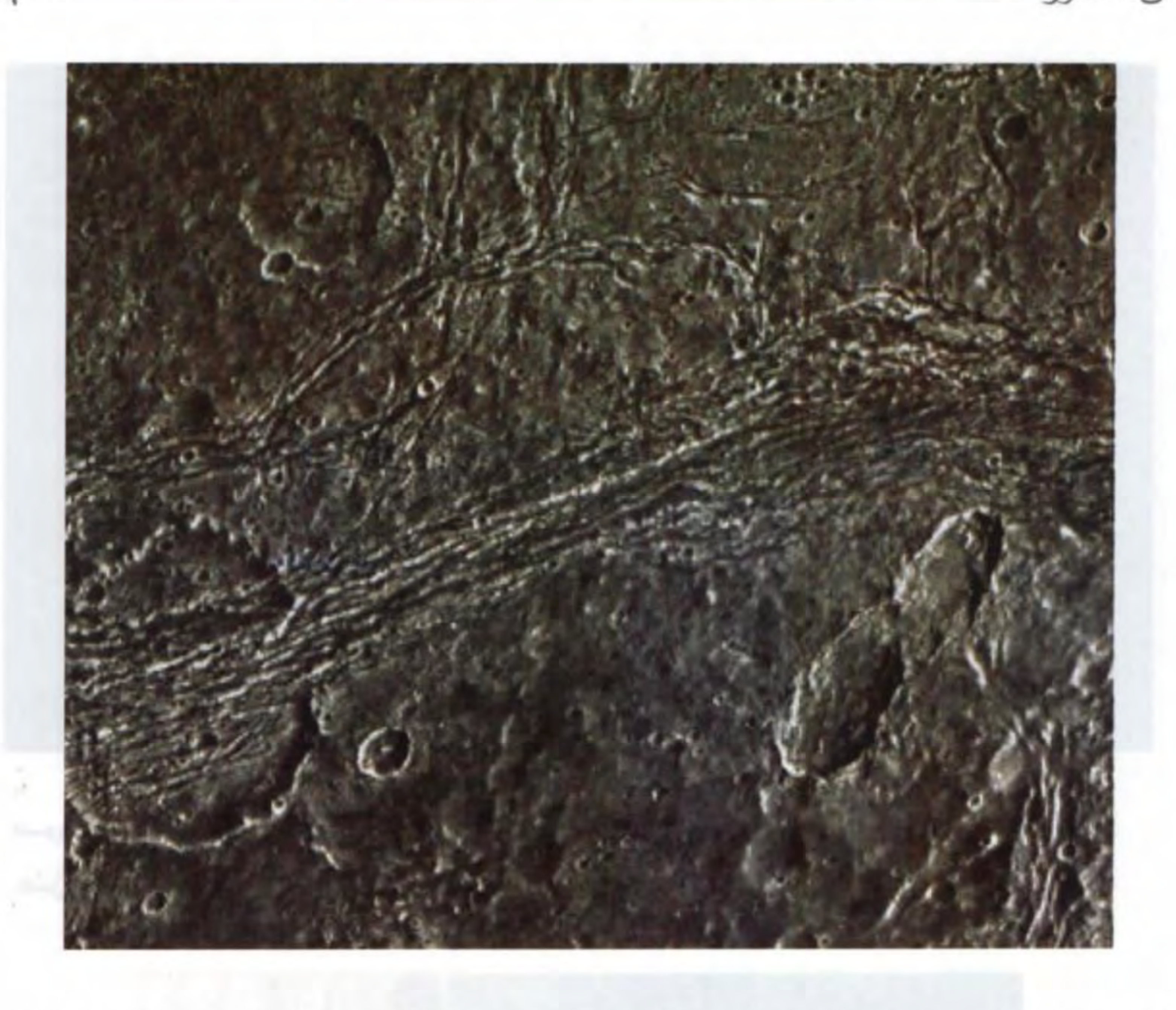


القمر (إيو) التابع لكوكب المُشْترِى على نحو ما صوَّرته عام ١٩٩٨ المركبة (جاليليو) من مسافة مائتين وأربعةٍ وتسعين ألف كيلومتر. انظر [توابع المُشْترِى]

اندلاع بركانيّ على سطح القمر (إيو) على نحو ما رصدته عام ٢٠٠٠ المركبة (جاليليو).
انظر [توابع المُشْتَرِى]



السطح المُكوَّن من الثلوج المُهشَّمة للقمر (أوروبا) التابع لكوكب المُشْتَرِى. وترجع اختلافات الألوان إلى ترسُّبات الجسيمات الدقيقة من الثلوج. والصورة مركبة من مجموعة من الصور التُقطت خلال عمليات رصد قامت بها المركبة (جاليليو) بين عامَيْ ١٩٩٦ و١٩٩٧. انظر [اقمار المُشْتَرِى]



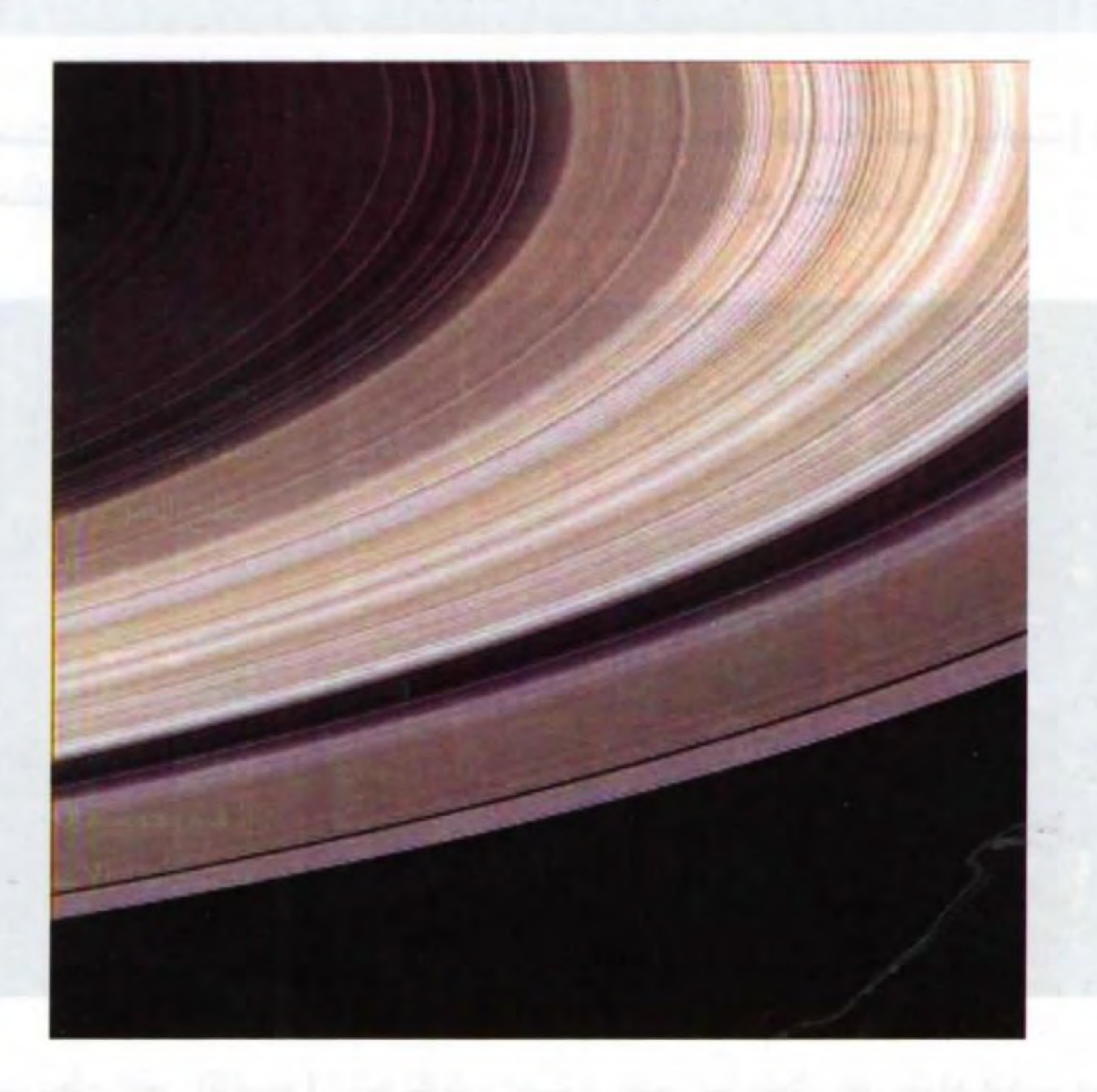
فُوَّهة تعرضت لتغيير شكلها نتيجة القُوَى التَّكْتُونِيَّة فى إحدى المناطق القاتمة بالقمر (چانيميد) التابع لكوكب المُشْتَرِى، ورصدتها عام ١٩٩٧ المركبة (جاليليو). انظر [توابع المُشْتَرِى]



منطقة على سطح القمر (كاليستو) التابع لكوكب المُشْتَرِى تظهر بها بشكل غير متوقع فُوَّهات صغيرة الحجم، وهى صورة تم التقاطها من المركبة (جاليليو) عام ١٩٩٦. انظر [توابع المُشْتَرِى]



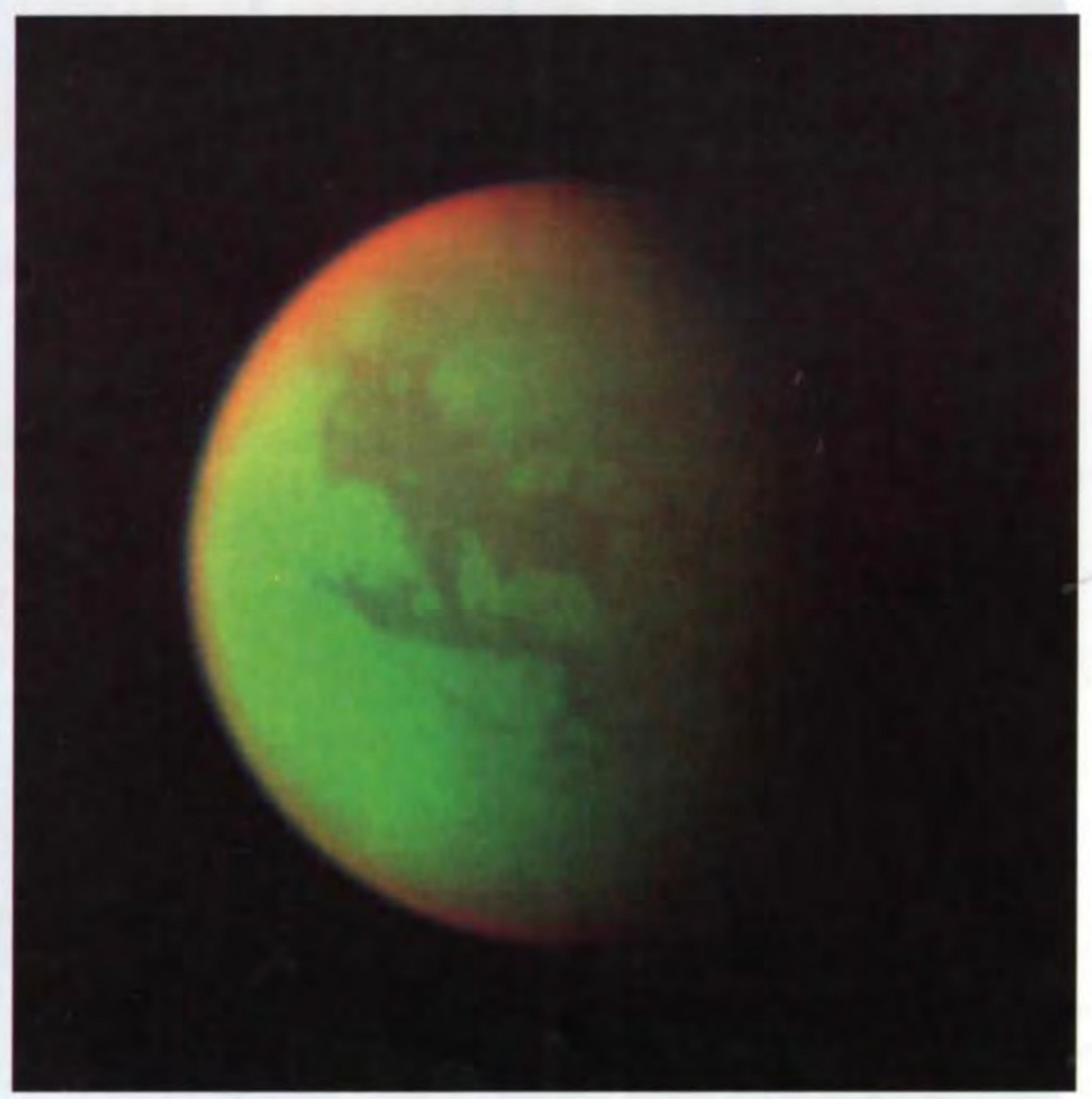
صورة للكوكب زُحَل التقطتها المركبة (كاسينى) فى نوفمبر عام ٢٠٠٣، من مسافةِ مائةٍ وأحدَ عشرَ مليون كيلومتر. انظر [الكوكب زُحَل]



صورة لحلقات زُحَل التقطتها المركبة (كاسينى) قبل تسعة أيام من دخولها في مدار على مسافة (٦,٤) مليون كيلومتر. وتتكون الحلقات بالأساس من ثلوج المياه. وترجع اختلافات الألوان على الأرجح إلى اختلاف درجات تداخل عناصر أخرى مثل الصخور ، على سبيل المثال. انظر [الكوكب زُحَل]



صورة للقمر (تَيْتَان) التابع للكوكب المتعملق زُحَل، ملتقطة بواسطة المركبة (كاسينى) فى يوليو عام ٢٠٠٤. ويظهر القمر بلونه البرتقالىّ المألوف فى مجال الضوء المرئىّ؛ لكن كذلك مع استخدام مرشح فوق بنفسجى لإظهار طبقات رقيقة من الغيوم (الستراتوسفيريَّة) (تبدو هنا أُرْجوانيَّة اللون). انظر [القمر تَيْتَان]



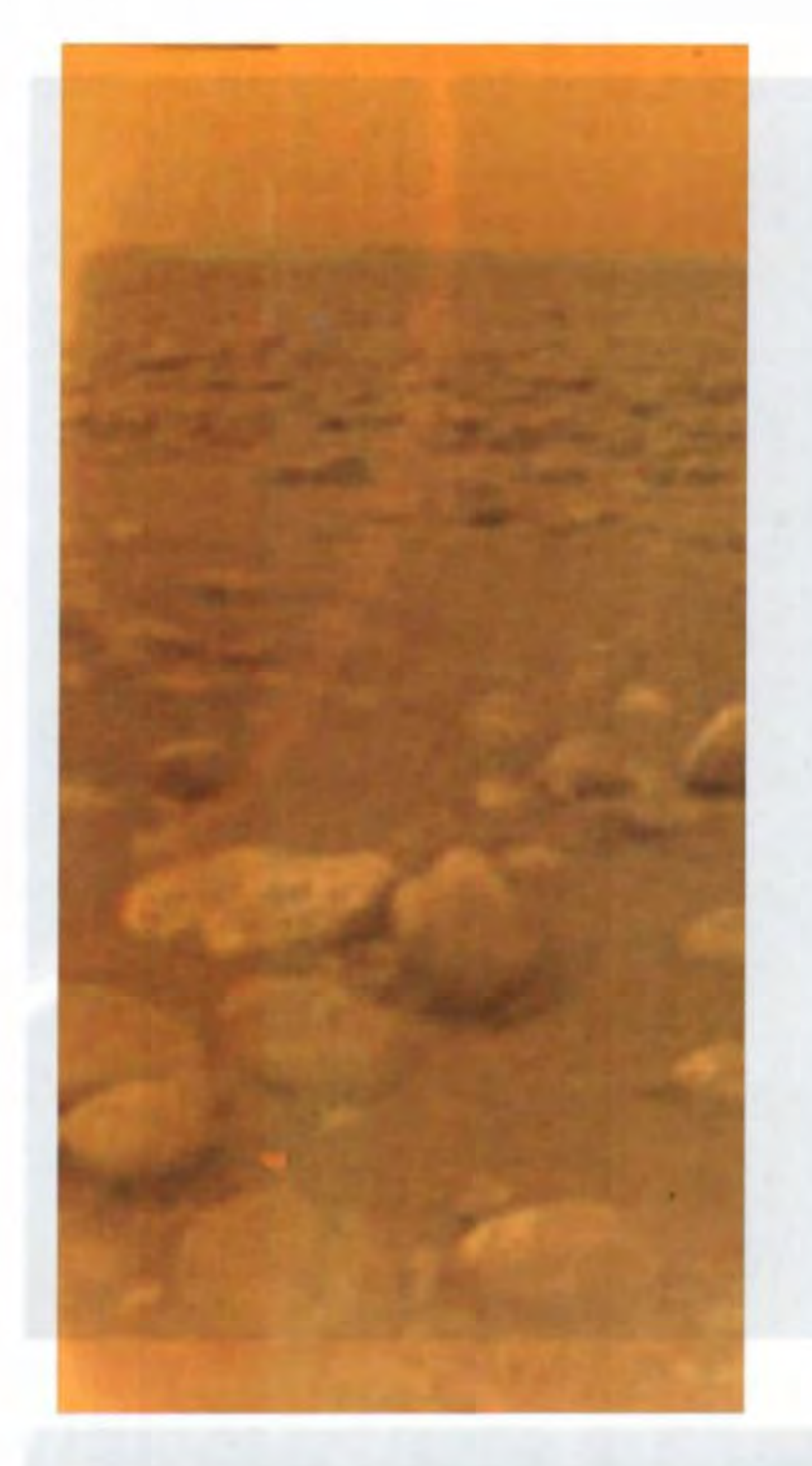
صورة للقمر (تَيْتَان) التابع للكوكب زُحَل بألوان غير حقيقية مركبة من صور ملتقطة من المركبة (كاسينى) فى أبريل عام ٢٠٠٥، فى مجال الضوء المرئى ومجال الأشعة تحت الحمراء. ويمثل اللون الأخضر المناطق التى أُتيح للمركب (كاسينى) رصد سطح القمر نفسه، ويبيِّن اللون الأزرق الغلاف الجَوِىّ العلوي، أما اللون الأحمر فيبيِّن المناطق (الستراتوسفيرية) التى يمتصُّ فيها (الميثان) ضوء الشمس. انظر [القمر تَيْتَان]



صورة لسطح القمر (تَيْتَان) ملتقطة فى مايو عام ٢٠٠٧ من المركبة (كاسينى) باستخدام الرادار. والجانب المعتم فى الصورة هو مُسطَّح سائل يبلغ عمقه عشرات الأمتار ومكوَّن على الأرجح من (الميثان) و(الإيثان). ويُظهر باقى الصورة كل المعالم لمنطقة ساحلية تشتمل على أنهار وخُلْجان وجُزُر. انظر [القمر تَيْتَان]



سطح القمر (تَيْتَان)على نحو ما رُصد من المركبة (هيجن) على عدة مراحل أثناء هبوطها على سطح القمر. ومن أعلى لأسفل، فإن الصف الأول من الصور التُقطت على ارتفاع مائةٍ وخمسين كيلومترًا ثم ثلاثين كيلومترًا ثم ثمانية كيلومترات، ثم ألفٍ وخمسمائةِ مترٍ وثلاثمائةِ مترٍ. أما الأعمدة من اليسار لليمين فهى للصور الملتقطة من جهة الغرب، ثم الشمال ثم الشرق ثم الجنوب. انظر [القمر تَيْتَان]



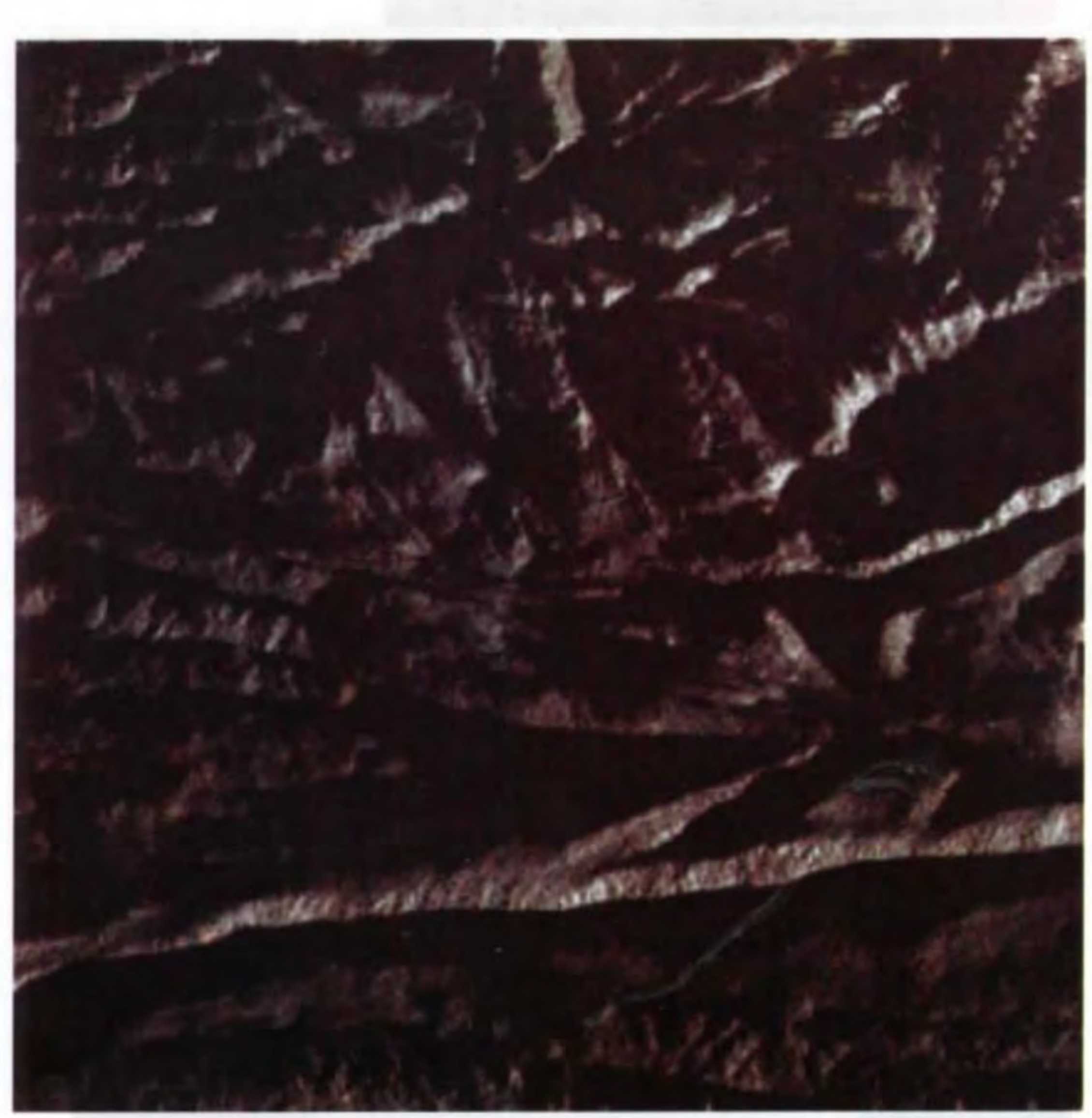
سطح القمر (تِيْتَان) على نحو ما صوَّرته المركبة (هيجن) من الوكالة الفضائية الأوروبية في الرابع عشر من يناير عام ٢٠٠٥. ولتقديم صورة عن الأبعاد، فإن الجسم المسطح في وسط الصورة وإلى اليسار قليلًا يقع على بعد خمسةٍ وثمانين سنتيمترًا، ويبلغ قطره خمسةَ عشرَ سنتيمترًا. والسطح مكون من خليط من ثلوج المياه و(الهيدروكربورات)، ونلحظ كذلك آثار تجريف يمكن إرجاعه إلى تدفُّقات سوائل. انظر [القمر تِيْتَان]



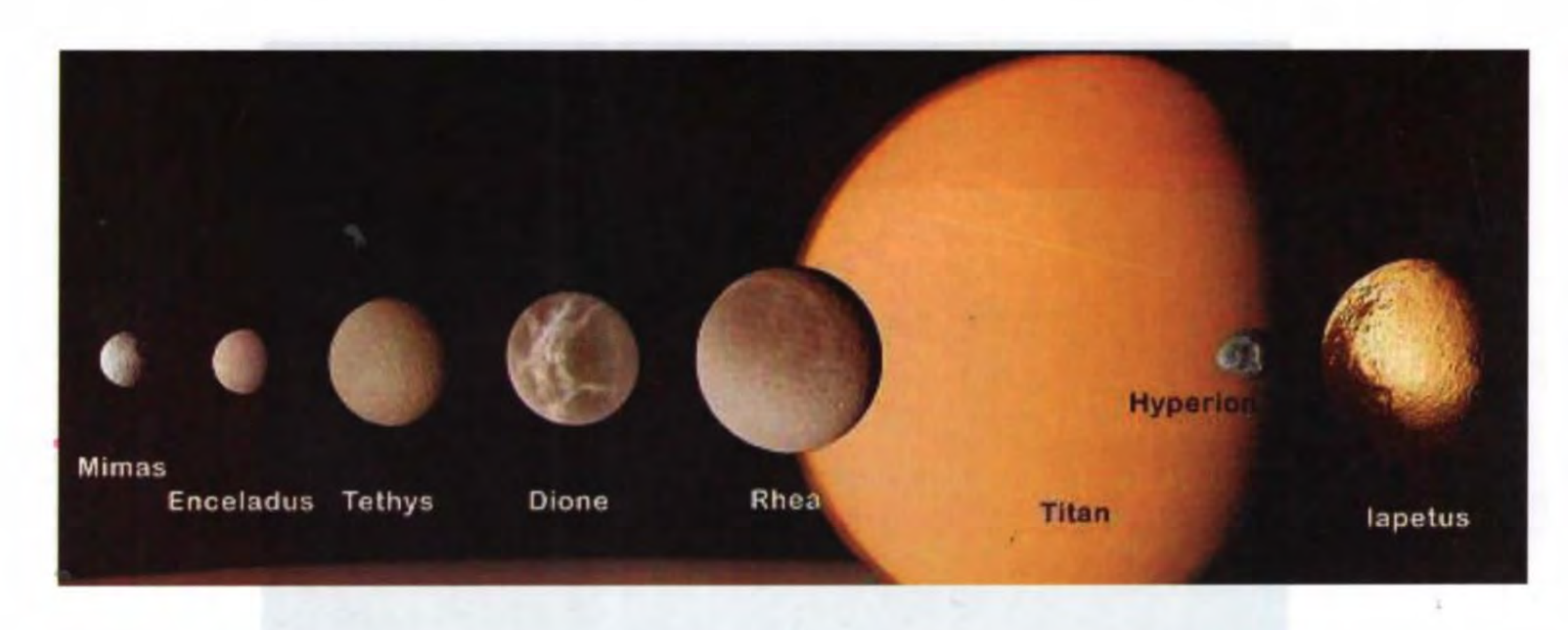
صورة شاملة ملتقطة في عام ٢٠٠٥، من المركبة (كاسيني)، نرى بها على مقربة من القطب الجنوبي "خطوط النَّمِر"، وهي مصدر اندلاعات البخار وثلوج القمر (أُونسيلادوس) التابع للكوكب المتعملق زُحَل. انظر [القمر أُونسيلادوس]



اندلاعات البخار والثلوج التى تم رصدها عام ٢٠٠٥ من المركبة (كاسينى). انظر [القمر أونسيلادوس]



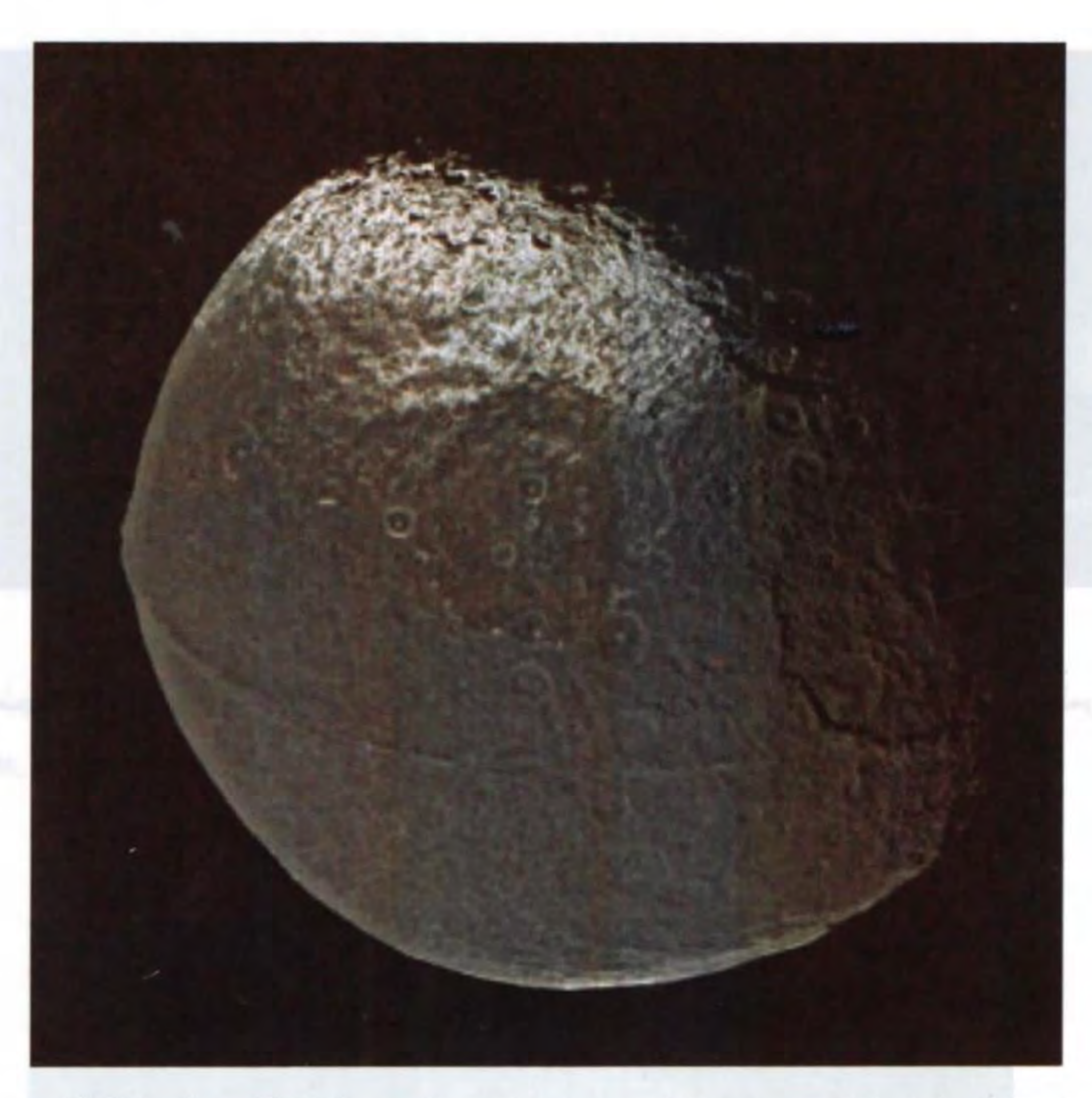
صورة مُكبَّرة لأحد خطوط النمر (Cairo Sulcus) أسفل الصورة، ملتقطة فى عام ٢٠٠٨ من المركبة (كاسينى) على مسافة ألفين وخمسمائة كيلومتر. انظر [القمر أونسيلادوس]



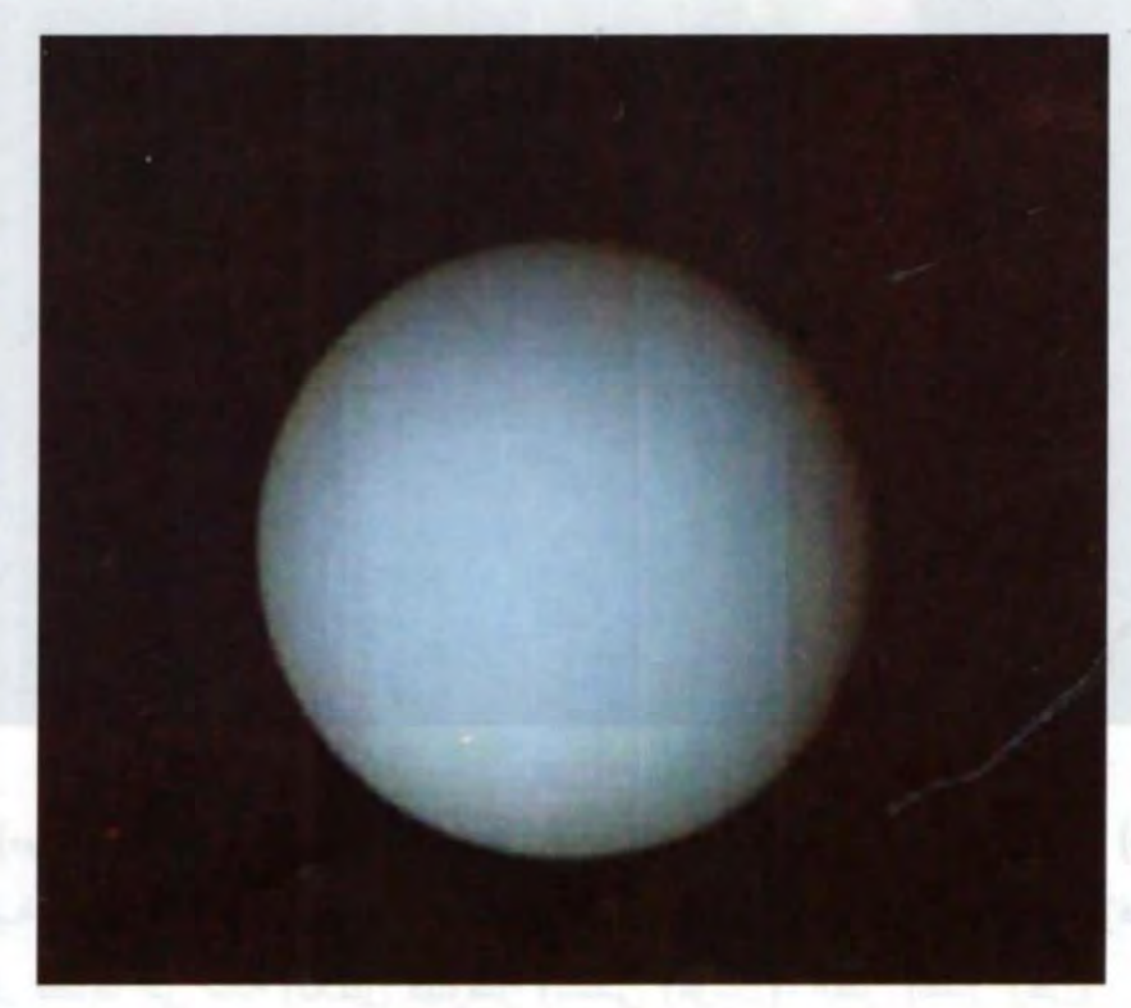
صورة مُجمَّعة للأقمار الرئيسة التابعة للكوكب زُحَل مركبة من صور ملتقطة خلال رحلات المركبة (ڤواياجير). انظر [أقمار زُحَل]



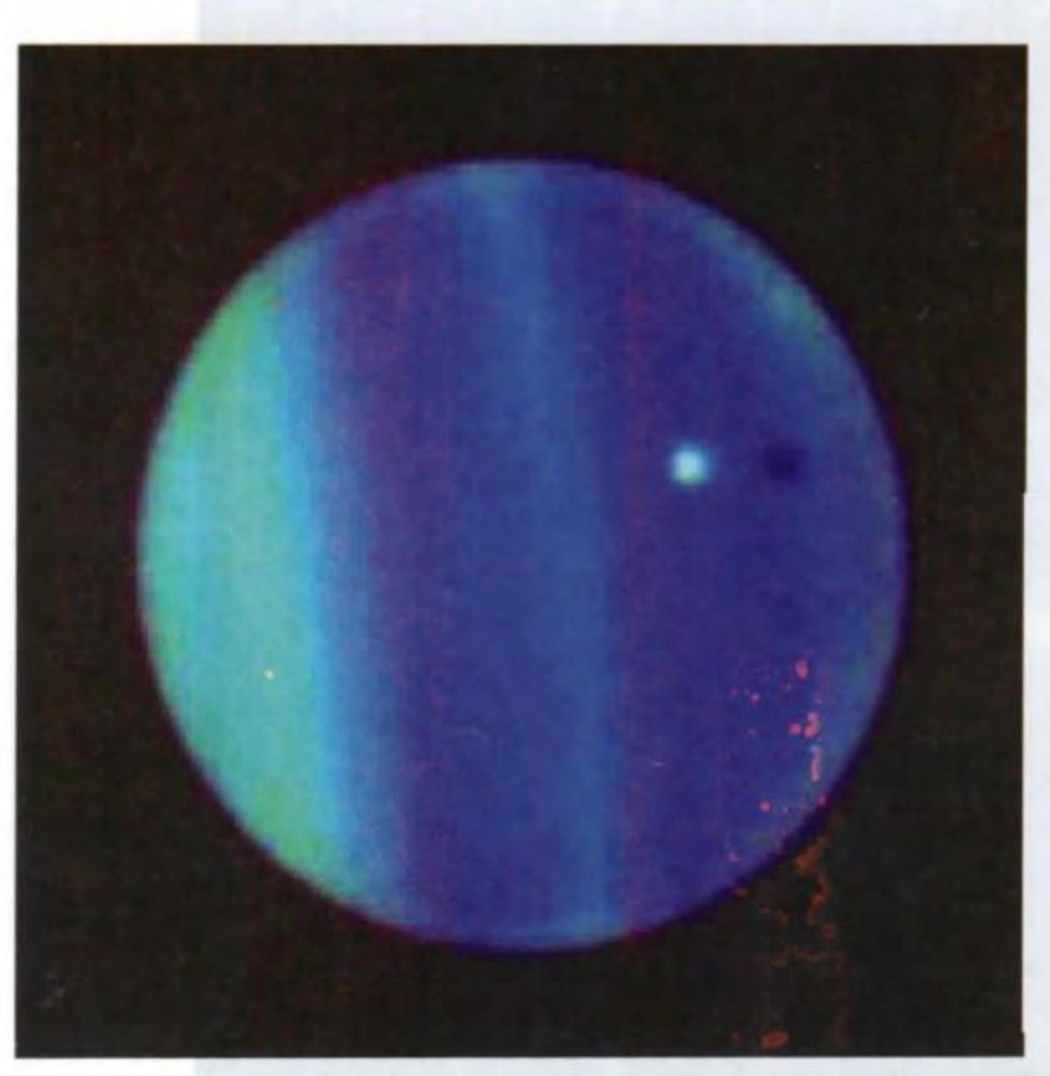
صورة للقمر (ميماس) التقطتها المركبة (كاسينى) فى أغسطس ٢٠٠٥، ويبلغ قطر (ميماس) ثلاثمائة وثمانية وتسعين كيلومترًا، ويعود مظهر حرب النجوم الذى يظهر به إلى فُوَّهة بالغة الضخامة يصل قطرها إلى مائة وثلاثين كيلومترًا وتُسمى (هرشل). انظر [أقمار زُحَل]



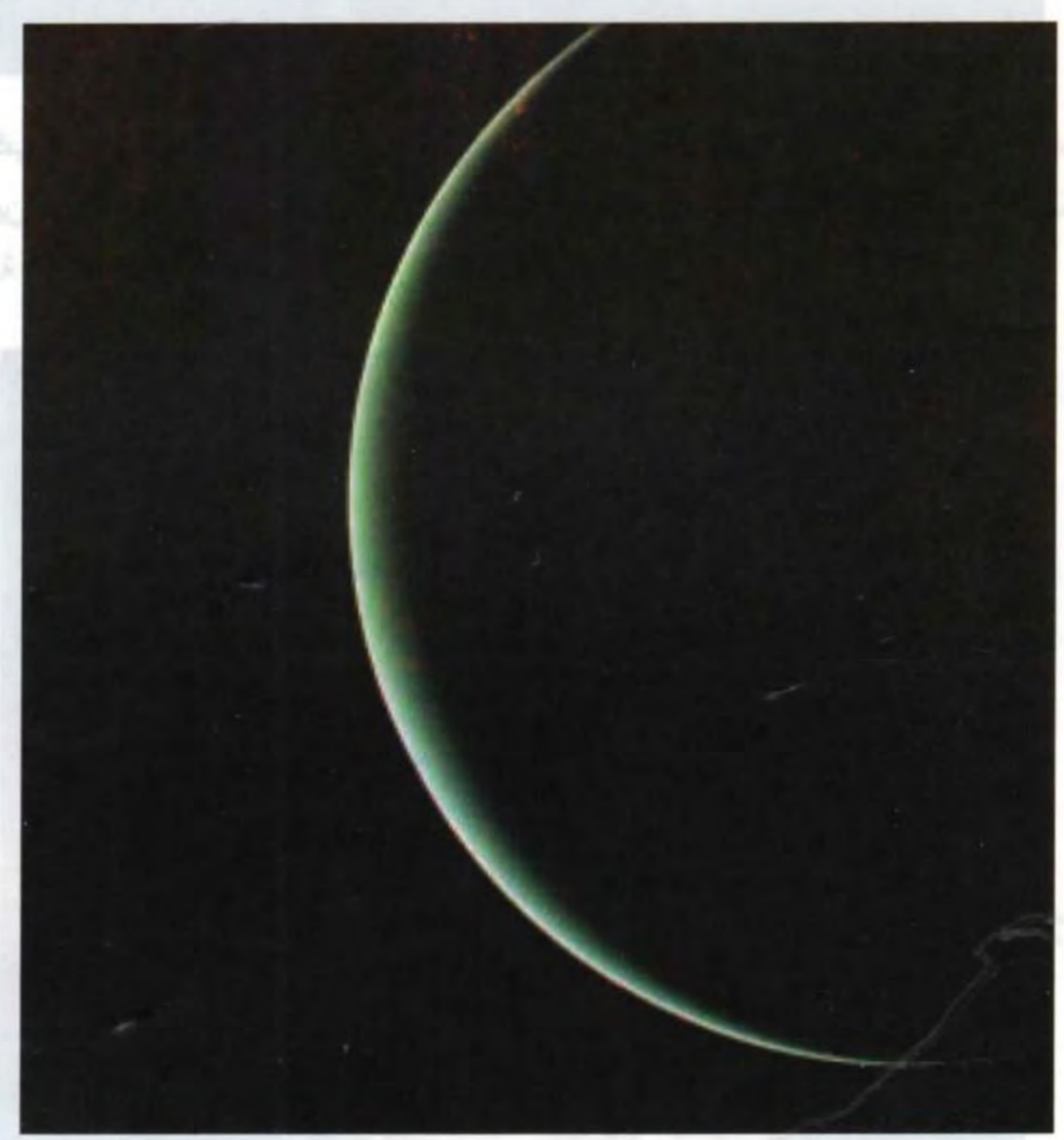
سطح القمر (جابيه) فى صورة مركبة من مجموعة من الصور الملتقطة من المركبة (كاسينى) فى ديسمبر عام ٢٠٠٤. ويمكننا تبيُّن وجود نوعين مختلفين تمامًا من سطح الأرض؛ فضلًا عن وجود قشرة أرضية غريبة الشكل بامتداد المنطقة الاستوائيَّة. انظر [أقمار زُحَل]



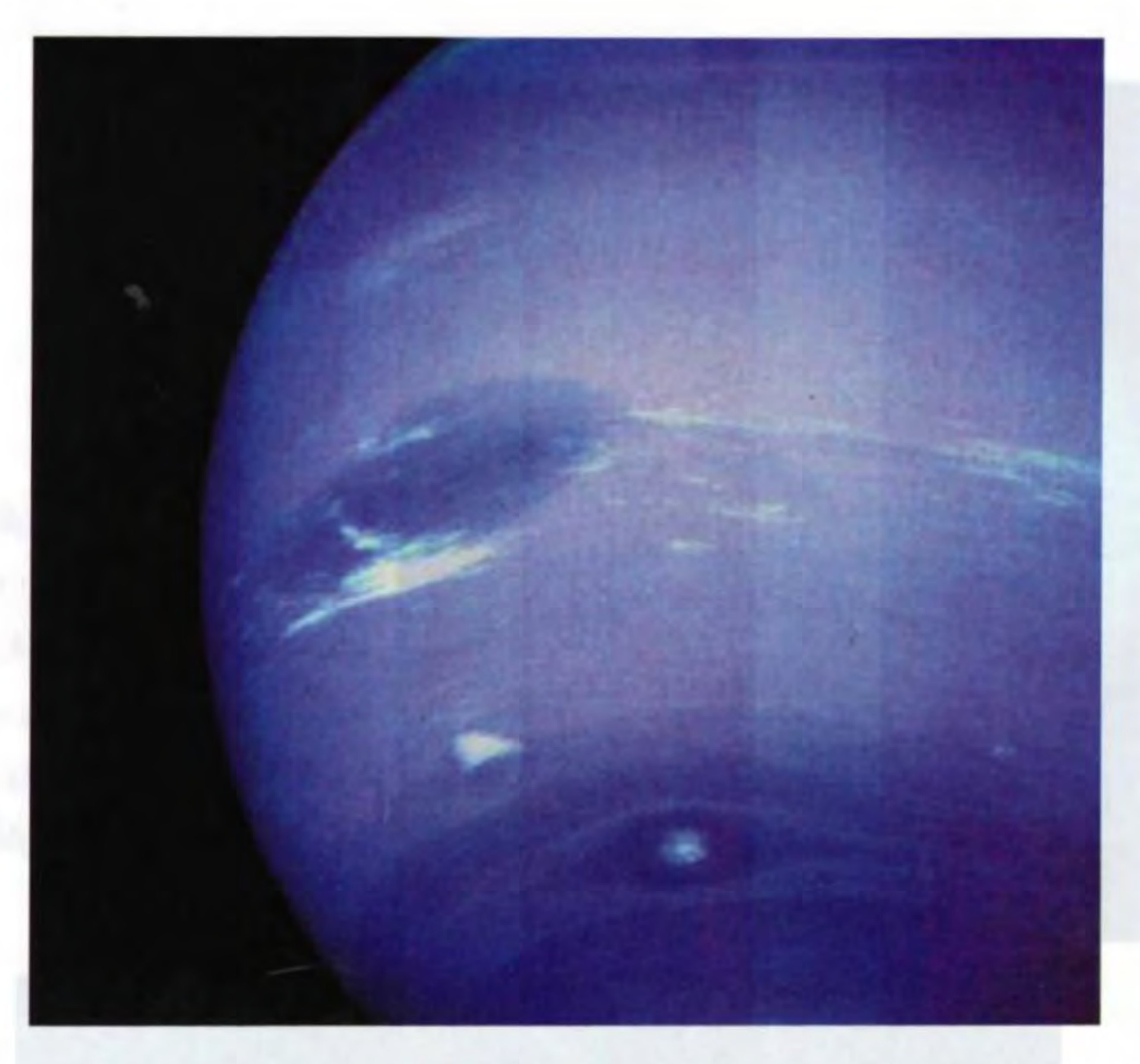
صورة للكوكب أورانوس ملتقطة من المركبة (ڤواياجير ٢) فى يناير عام ١٩٨٦. انظر [الكوكب أورانوس]



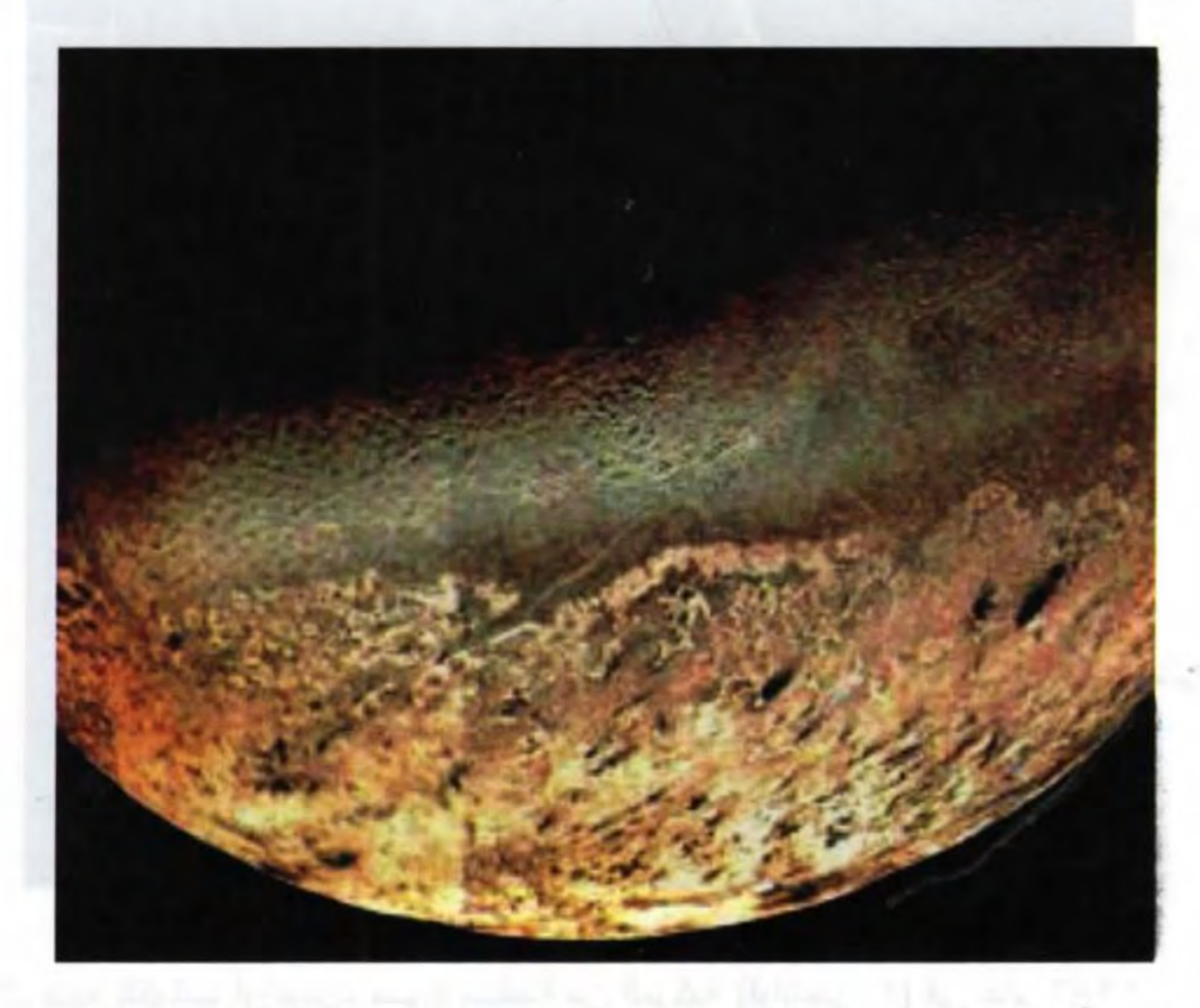
صورة لكوكب أورانوس ملتقطة فى عام ٢٠٠٦ من المرْقَب الفضائى (هابل) فى مجال الأشعة تحْت الحمراء، ويمكننا تبيُّن القمر التابع (آرييل) وكذلك ظله على الكوكب. انظر [الكوكب أورانوس]



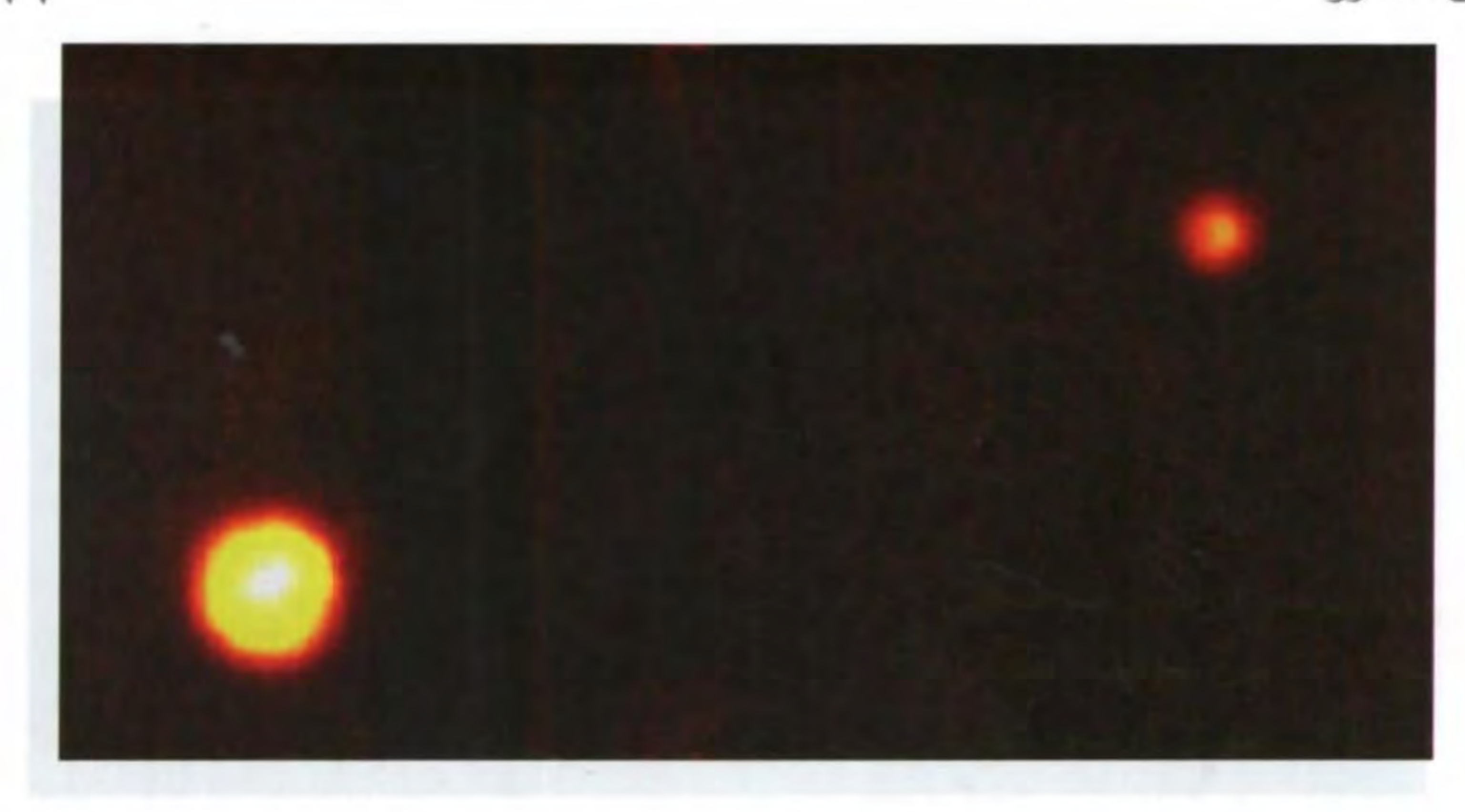
هلال بديع للكوكب أورانوس، صورة ملتقطة من المركبة (ڤواياجير ٢) في عام ١٩٨٦ من مسافة ثمانمائة ألف كيلومتر. انظر [الكوكب أورانوس]



الكوكب نِبْتُون على نحو ما رصدته المركبة (ڤواياجير ٢) عام ١٩٨٩ على مسافة عدة ملايين من الكيلومترات، ونتبين بعض سحب بيضاء عالية الارتفاع وكذلك بقعة قاتمة راجعة إلى نوع من الأعاصير. انظر [الكوكب نبتون]



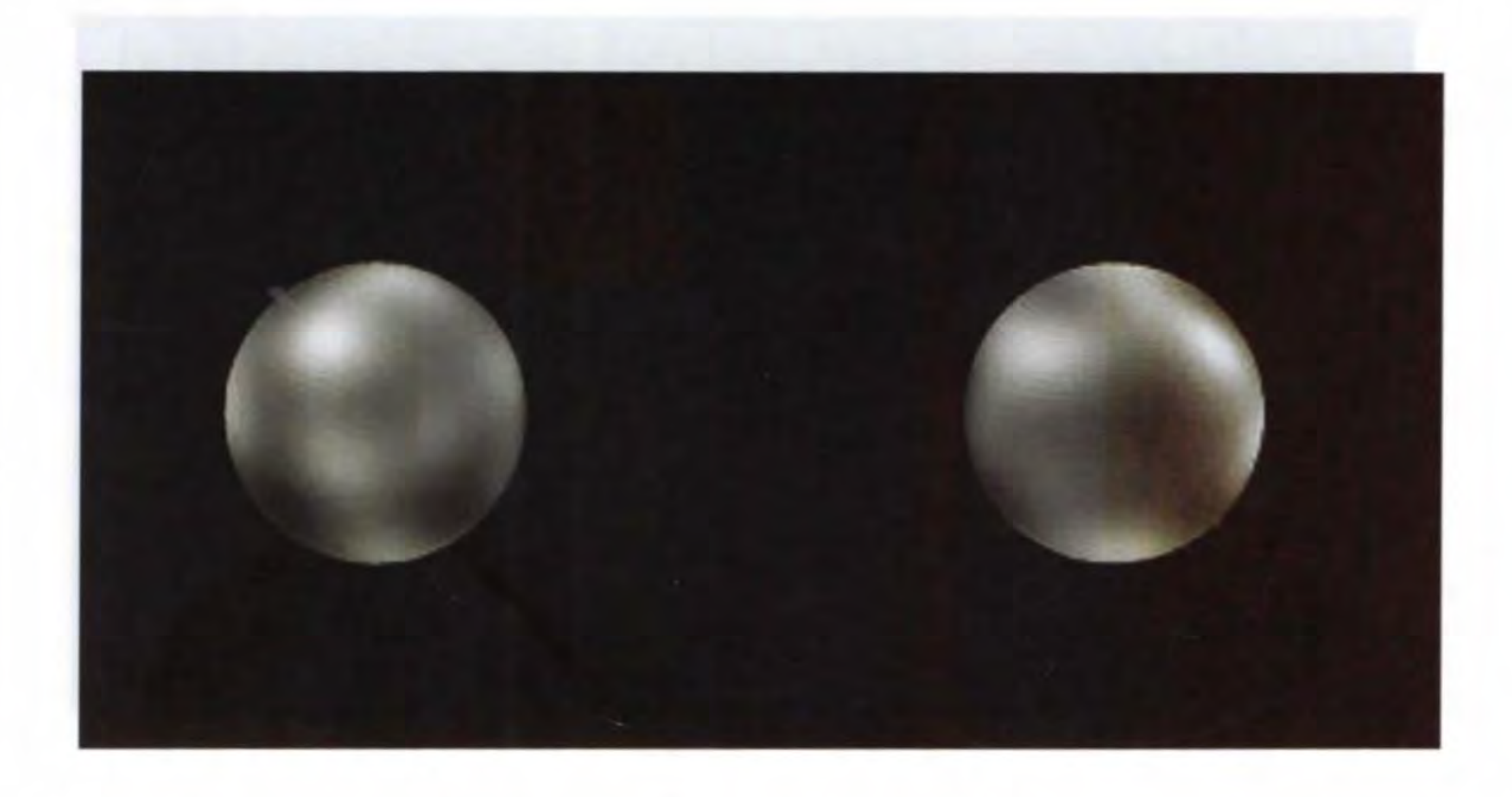
صورة مركَّبة للقمر (ترايتون) مكونة من مجموعة من الصور التقطتها المركبة (ڤواياجير ٢) فى يوليو عام ١٩٨٩. انظر [الكوكب نبتون]



الكوكب (بلُوتُو) إلى اليسار وتابعه (شارون) على نحو ما رصدهما المرْقَب الفضائىّ (هابل) فى عام ١٩٩٤، وتبلغ المسافة بين الثنائىّ تسعة عشر ألفًا وستمائة كيلومتر]. انظر [بلوتو والكواكب المتقزِّمة الخارجيَّة]



منظومة أقمار بلوتو على نحو ما رصدها المِرْقَب الفضائي (هابل) في فبراير عام ٢٠٠٦، والقمران (نيكس) و(هيدرا) كان قد تم اكتشافهما فى مايو من العام السابق من المِرْقَب ذاته. انظر [بلوتو والكواكب المتقزمة الخارجية]



صورة مرسومة، وليست ملتقطة فوتوغرافيًا، لسطح الكوكب (بلوتو)، تم رسمها عام ١٩٩٤ عن طريق معالجة رقمية للمعطيات المُستخرَجة من عمليات رصد قام بها المِرْقَب (هابل). ويمكننا تبيُّن اختلافات شديدة الوضوح على مستوى الكوكب راجعة على الأرجح إلى توزيع الثلوج على سطحه. انظر [بلوتو والكواكب المتقزمة الخارجية]



الكوكب المتقزِّم (أريس) وتابعه (ديسنوميا) حسبما صوَّرهما المَرْصَد (كيك) في العام ٢٠٠٥ بمساعدة نظام العدسات المنضبطة. انظر [بلوتو والكواكب المتقزمة الخارجية]



صورة للمُذَنَّب (نيت) ملتقطة عام ٢٠٠٤ من المَرْصَد (كيت بيك)، وتظهر بوضوح النواة والهالة المحيطة بها فضلًا عن الجزء الأقرب من الذيل. انظر [المُذَنَّبات]



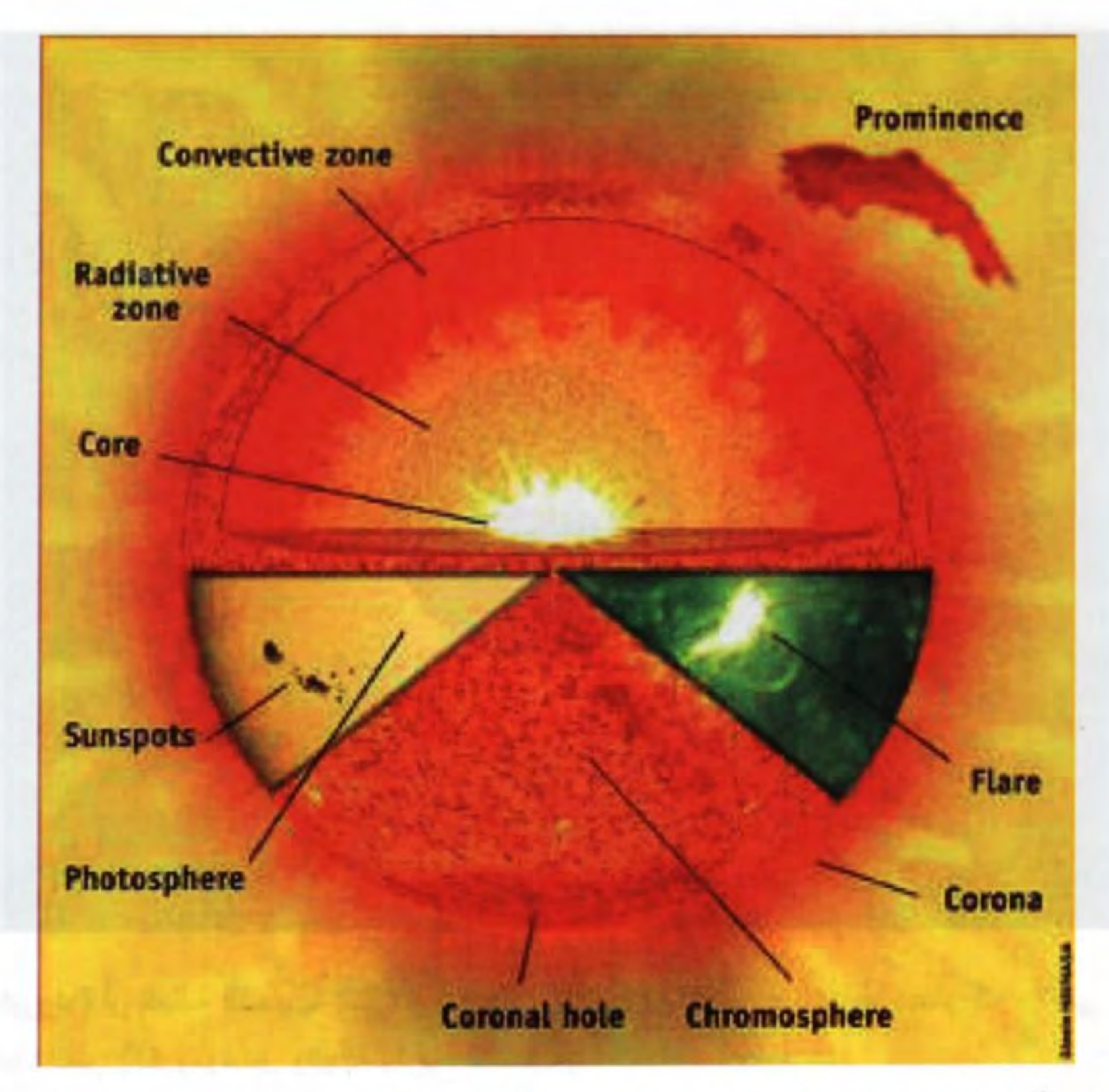
نواة المُذَنَّب (تمپل ١) الصورة الملتقطة فى الرابع من يوليو عام ٢٠٠٥ من المركبة (ديپ إمپاكت)، بعد سبعٍ وستين ثانية من تعرُّضها لارتطام قذيفة تزن ثلاثمائة وسبعين كيلوجرامًا أطلقتها المركبة. وهدف الارتطام كان إتاحة تحليل المادة الجوفية للمُذَنَّب وعدم الاكتفاء بمادة السطح. ولما كان من المرجَّح ألَّا يكون التركيب الداخلىّ للمُذَنَّب لم يتغير على الإطلاق منذ مولده، فمن شأنه أن يلقى مزيدًا من الضوء والإيضاح حول ملابسات نشأة المجموعة الشمسيَّة منذ (٤,٦) مليار عام. انظر [المُذَنَّبات]



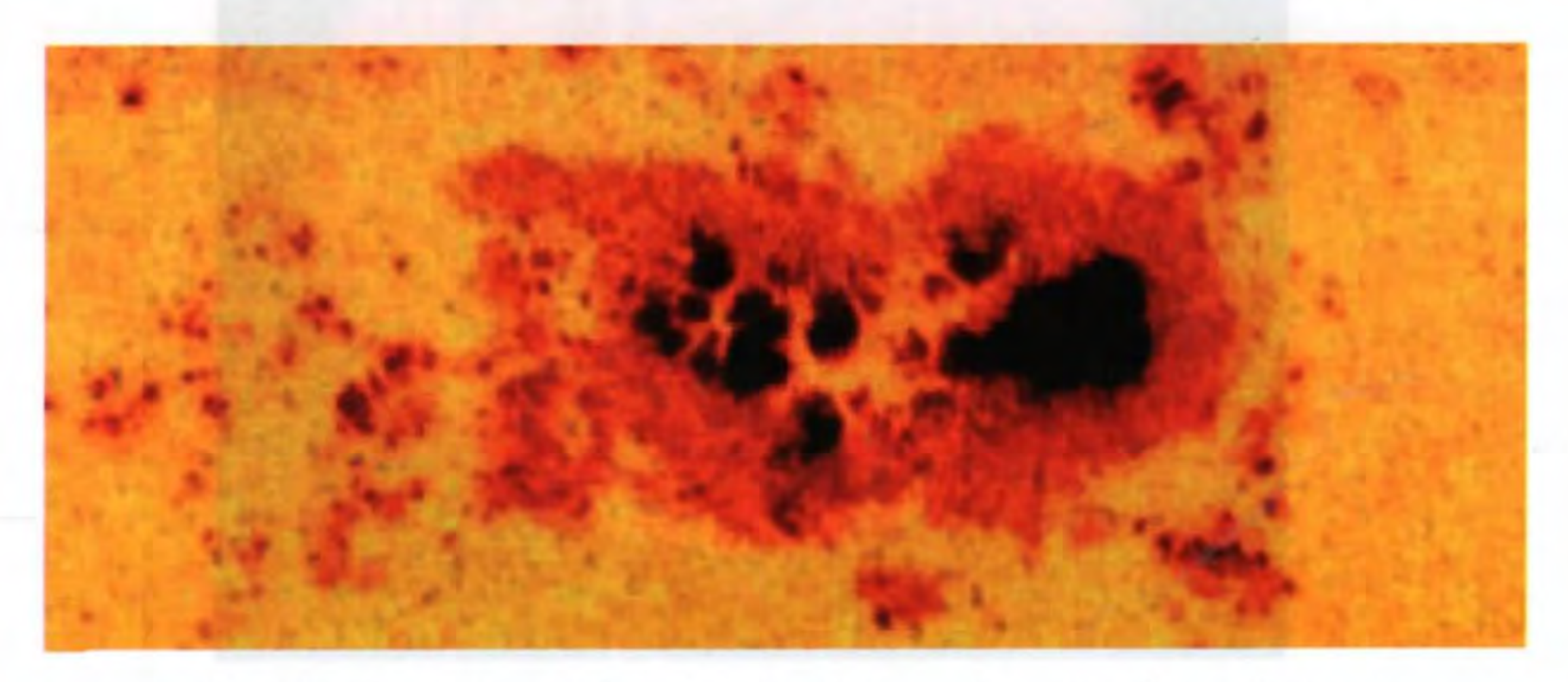
نواة المُذَنَّب (وايلد ٢) فى الصورة الملتقطة من مسافة خمسمائة كيلومتر ، إبَّانَ تحليق المركبة الأمريكيَّة (ستارداست ٢) فى يناير ٢٠٠٤. وقد استهدفت المركبة جمع جسيمات متناهية الدقة منبعثة من المُذَنَّب بهدف جلبها للأرض، وكان من شأن المعلومات المُستنتجَة من ذلك أن تساعد فى التوصل إلى فهم أعمق للمُذَنَّبات ولتاريخ نشأة المجموعة الشمسية. انظر [المُذَنَّبات]



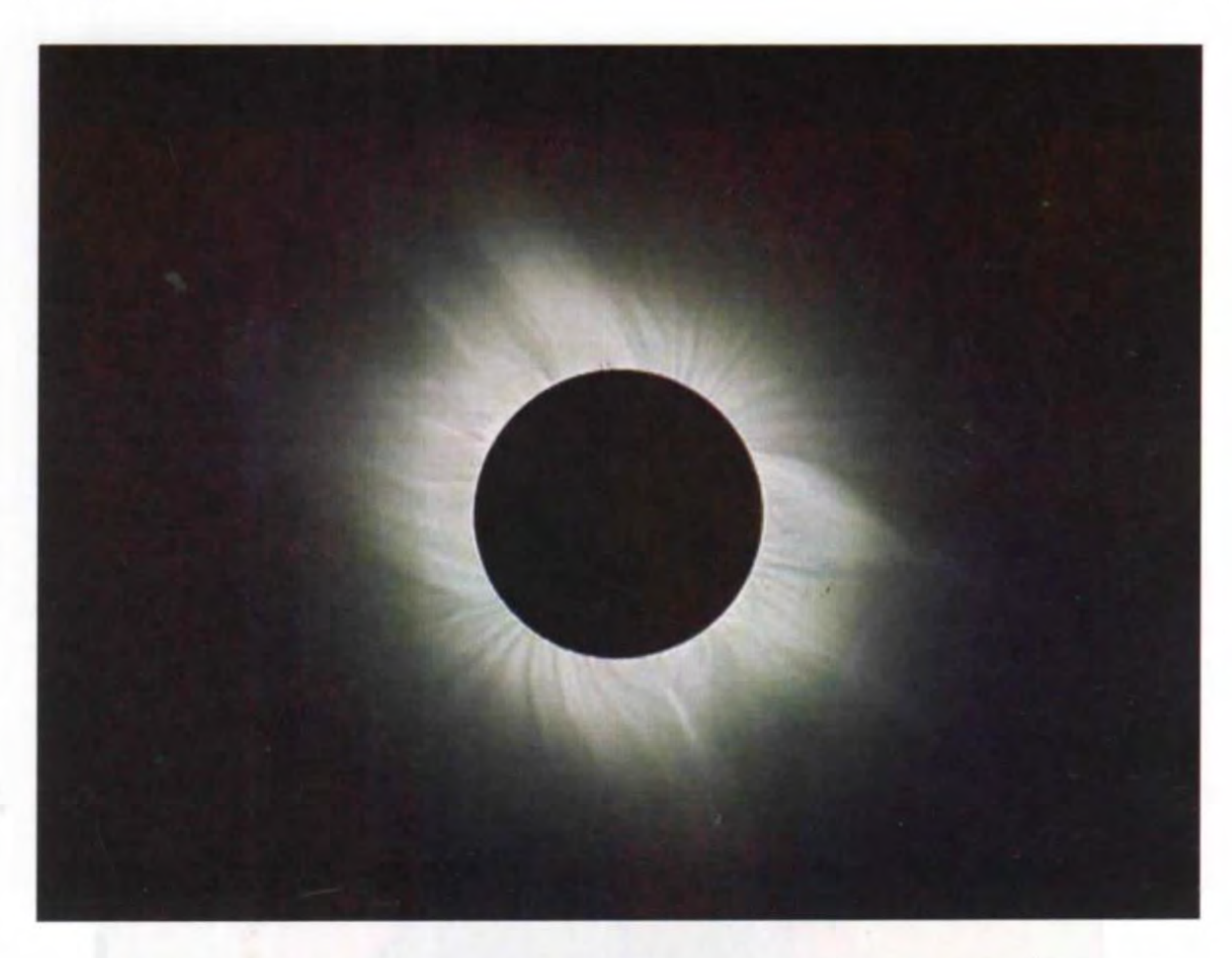
صورة لواحد من كويكبات حزام (كويبر) اسمه (٢٠٠١ كى إكس ٧٦)، التقطها مِرْقَب يبلغ قطره (٢,٢) مترًا فى المَرْصَد الأوروبى الجنوبى فى (سيلا) فى (شيلى). ويُقدر قطر الجرم بألفٍ ومائتَىْ كيلومتر، وهو ما يجعله أكبر من الكويكب (سيريس) أكبر أجرام حزام الكويكبات بين المِرِّيخ والمُشْترِى. انظر [حزام (كويبر) وسحابة (أُورت)]



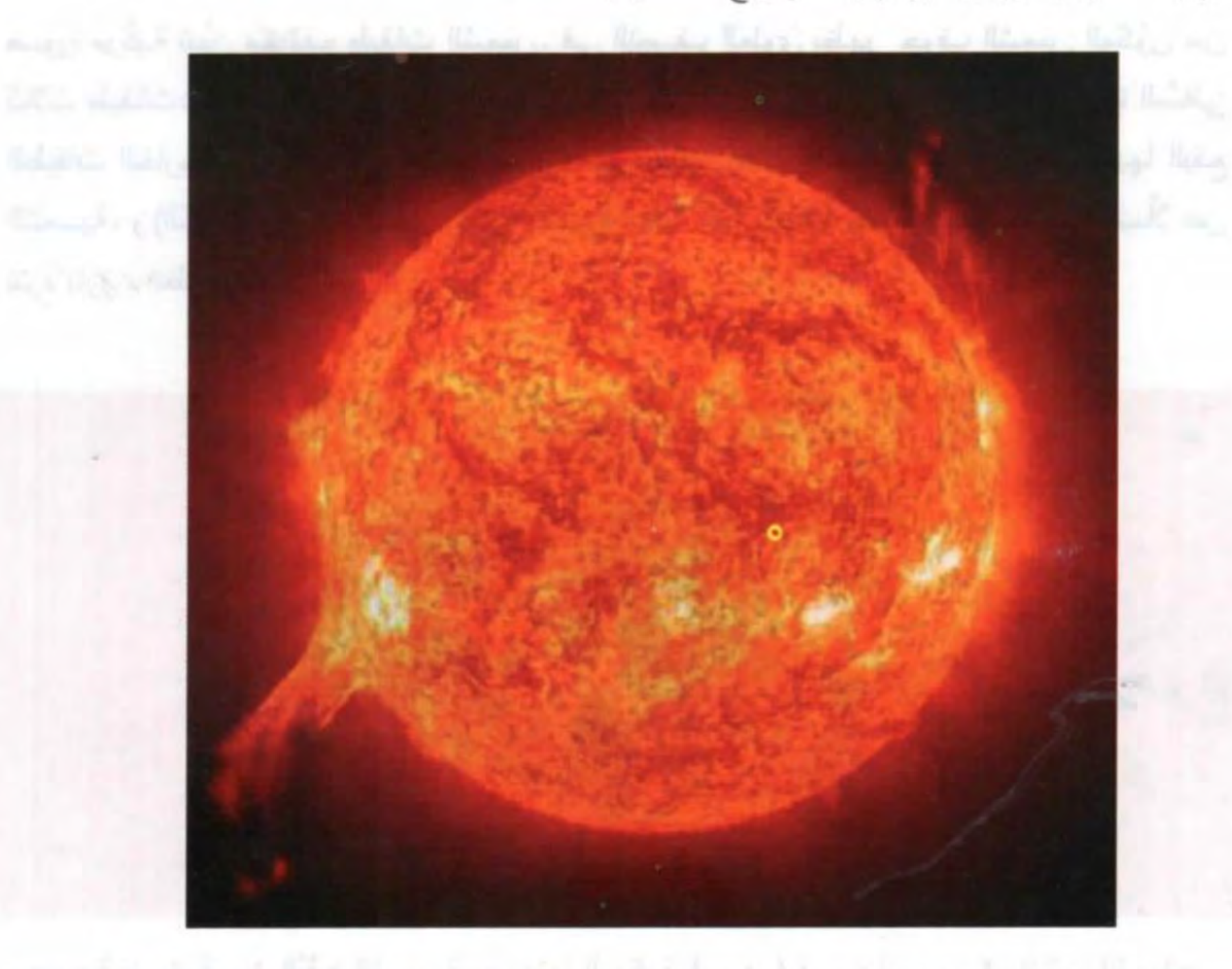
صورة مركَّبة تبيِّن مختلف طبقات الشمس. فى النصف العلوىّ يظهر جوف الشمس المكوَّن من ثلاث طبقات: النُّوَاة والمِنْطَقة المُشعَّة ومنطقة الحِمْل الحرارىّ. ويوضح نصف الصورة السُّفلىّ الطبقات الخارجية الثلاث؛ وهى: (الفوتوسفير) التى يمكن اعتبارها سطح الشمس وتظهر بها البقع الشمسية، و(الكروموسفير) والهالة. وتبين الصورة أيضًا ثقبًا بالهالة ولسان لهب شمسيًّا فضلًا عن نتوءٍ بارز. انظر [الشمس]



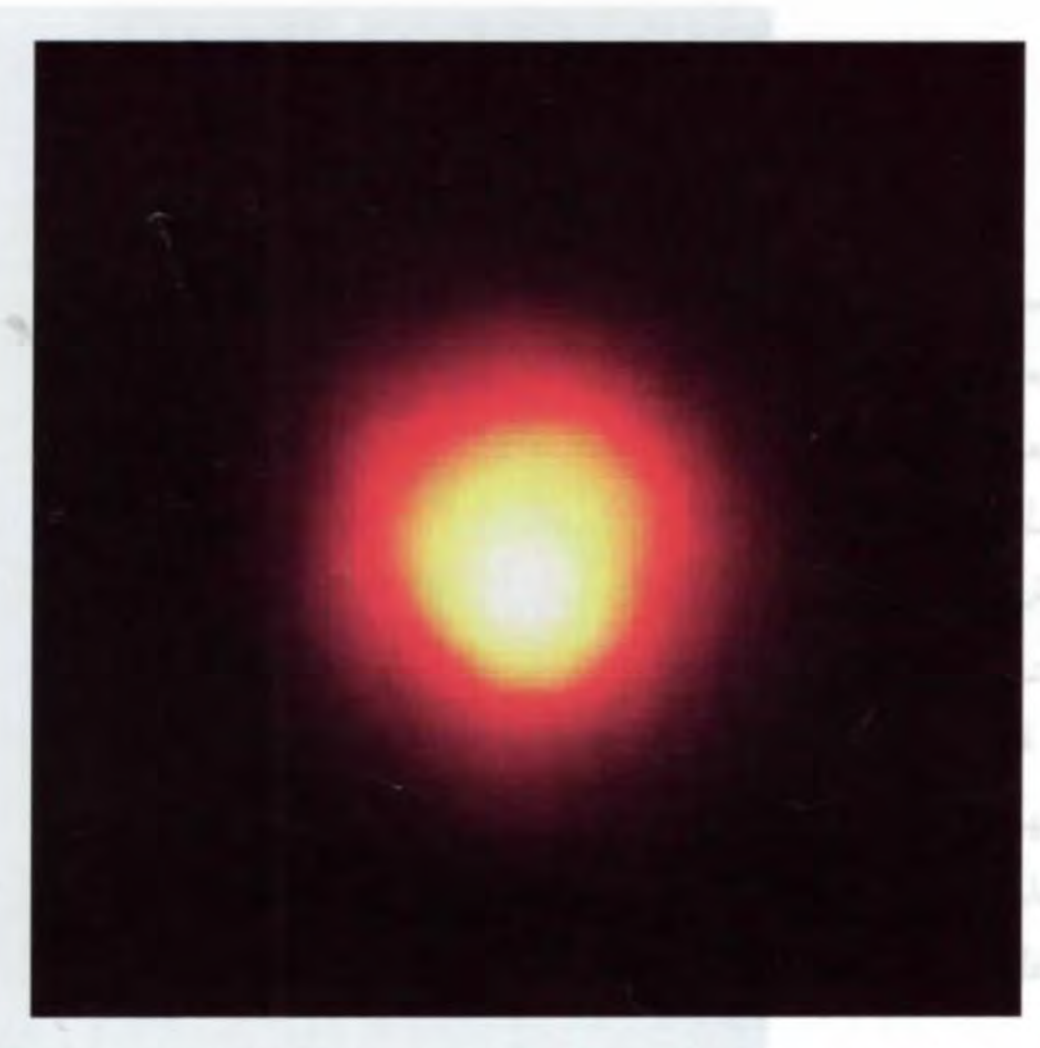
مجموعة ضخمة من البُقَع الشمسية رصدتها المركبة (سوهو) فى عام ٢٠٠٠. انظر [السطح والبقع والمغناطيسيَّة]



(الكورونا) أو الهالـة الشمسيَّة التى ظهرت إبَّانَ كسوفٍ للشمس فى مارس عام ٢٠٠٦ فى تركيا. انظر [الكروموسفير والهالة والريح الشمسيَّة]



نتوء ضخم رصدته المركبة (سوهو) فى عام ٢٠٠٢]. انظر [الكروموسفير والهالة والرياح الشمسية]



صورة لنجم إبط الجوزاء ملتقطة فى عام ١٩٩٦ من المِرْقَب الفضائىّ (هابل)، وهى أول صورة مباشرة لسطح نجم غير الشمس. وإبط الجوزاء هو نجم فوق متعملق أحمر بقُطْر نحو خمسمائة مثل قطر الشمس. ويمكننا تمييز بقع لامعة حرارتها تزيد بمقدار ألفَىْ درجة على حرارة سطح النجم. انظر [حجم وكتلة النجوم]

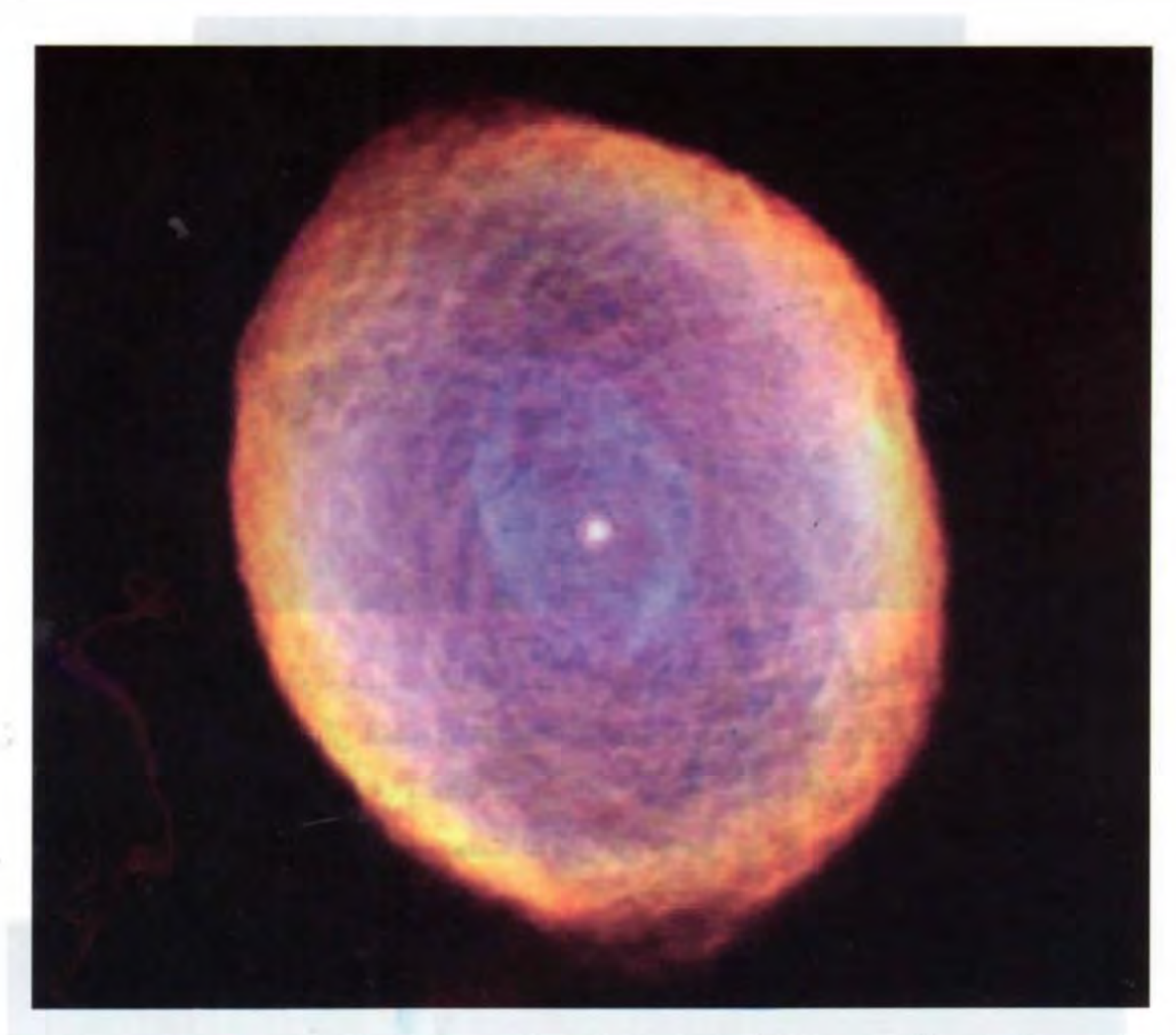


المجموعة النجميَّة الكُرِّيَّة (ميسييه ٨٠) التى رصدها المِرْقَب الفضائىّ (هابل). انظر [خط التتابُع الرئيس]

النجم (بيتا سيتى) الذى رصده عام ٢٠٠١ مَرْصَد (شاندرا) فى مجال الأشعة السِّينيَّة. وبلغت درجة حرارة نُواة هذا النجم مائة مليون درجة وبدأ به اندماج (الهليوم)، وقد تجاوز فى الوقت الحالىّ مرحلة المتعملق الأحمر ، وهو محاط بهالة شديدة السخونة تطلق انبعاثات لأشعَّة (إكس). انظر [المتعملقات الحمراء]



السديم الكوكبىّ (إن جى سى ٦٥٤٣) الذى رصده المِرْقَب الفضائى (هابل) عام ٢٠٠٤، ويضم على الأقل إحدى عشرة قوقعةً مركزيَّةً من المادة المقذوفة. انظر [السُدُم الكوكبية]



السديم الكوكبى (أى سى ٤١٨) وقد تحول النجم الموجود فى مركزه إلى سديم كوكبى منذ عدة آلاف من السنوات، ويبلغ قطر السديم حاليًا (٠,٢) سنة ضوئية. انظر [السدم الكوكبية]



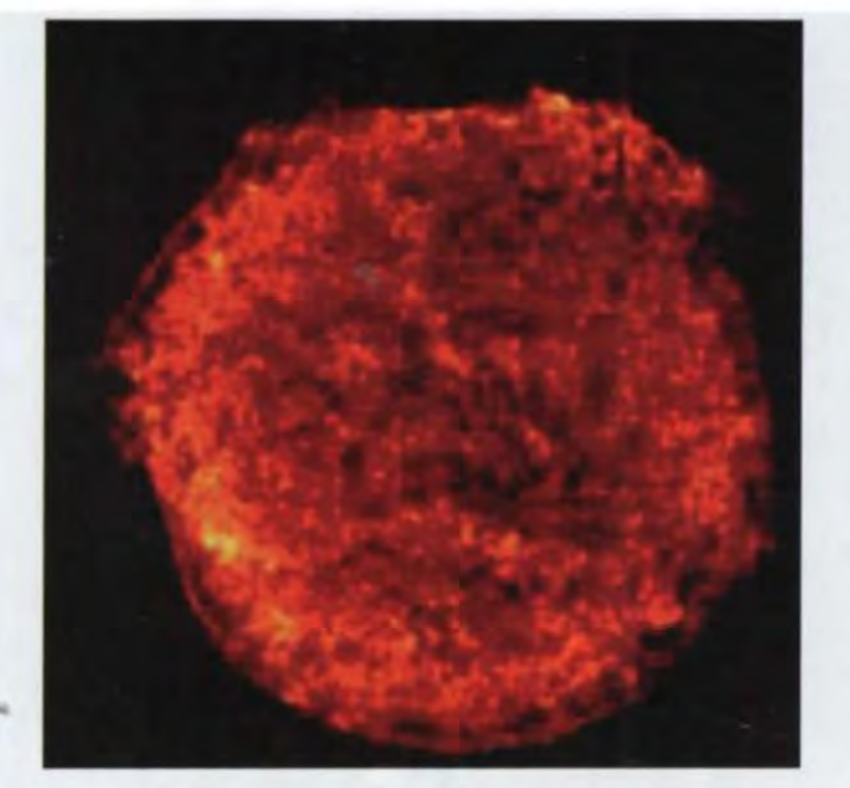
الثنائىُ النجمىُ الشِّعرَى اليمانية (سايروس)(أ) و(ب) على بُعد (٨,٦) سنة ضوئية من الأرض، وقام برصده فى مجال أشعة (إكس) القمر الصناعى (شاندرا). وفى هذه الصورة النجم (سايروس – ب) هو الجرم الألمع؛ لأن سطحه الذى تبلغ حرارته خمسة وعشرين ألف درجة يطلق انبعاثات لأشعة (إكس) بكثافة. أما النقطة المضيئة الثانية فى الصورة فهى (سايروس– أ) ألمع نجوم السماء فى المجال المرئىّ؛ غير أنه يصعُب رصده عمليًا فى هذا الطول الموجىّ، وهو ما لم يظهر فى هذه الصورة إلا بسبب انبعاثاته فى مجال الأشعة فوق البنفسجية التى لم تحجبها تمامًا مُفلترات المَرْصَد (شاندرا). والشكل النجمىّ إنما هو ناجم عن تأثير أحد العوامل الضوئيَّة الخاصة بالمِرْقَب. انظر [المتقزمات البيضاء]



صورة تخيُّلية لنجم نوڤا فى مرحلة التحوُّل قبل الانفجار؛ حيث ينطلق غاز المتعملق الأحمر (الموجود فى يسار الصورة) شيئًا فشيئًا نحو القرص المحيط بالمتقزم الأبيض (فى اليمين) وينتهى بالسقوط عليه. وعندما يتراكم الغاز بشكلٍ كافٍ وتبلغ الحرارة عشرة ملايين درجة، يبدأ اندماج (الهيدروچين) ويحدث انفجار مُروِّع على سطح النجم. انظر [النوڤا]



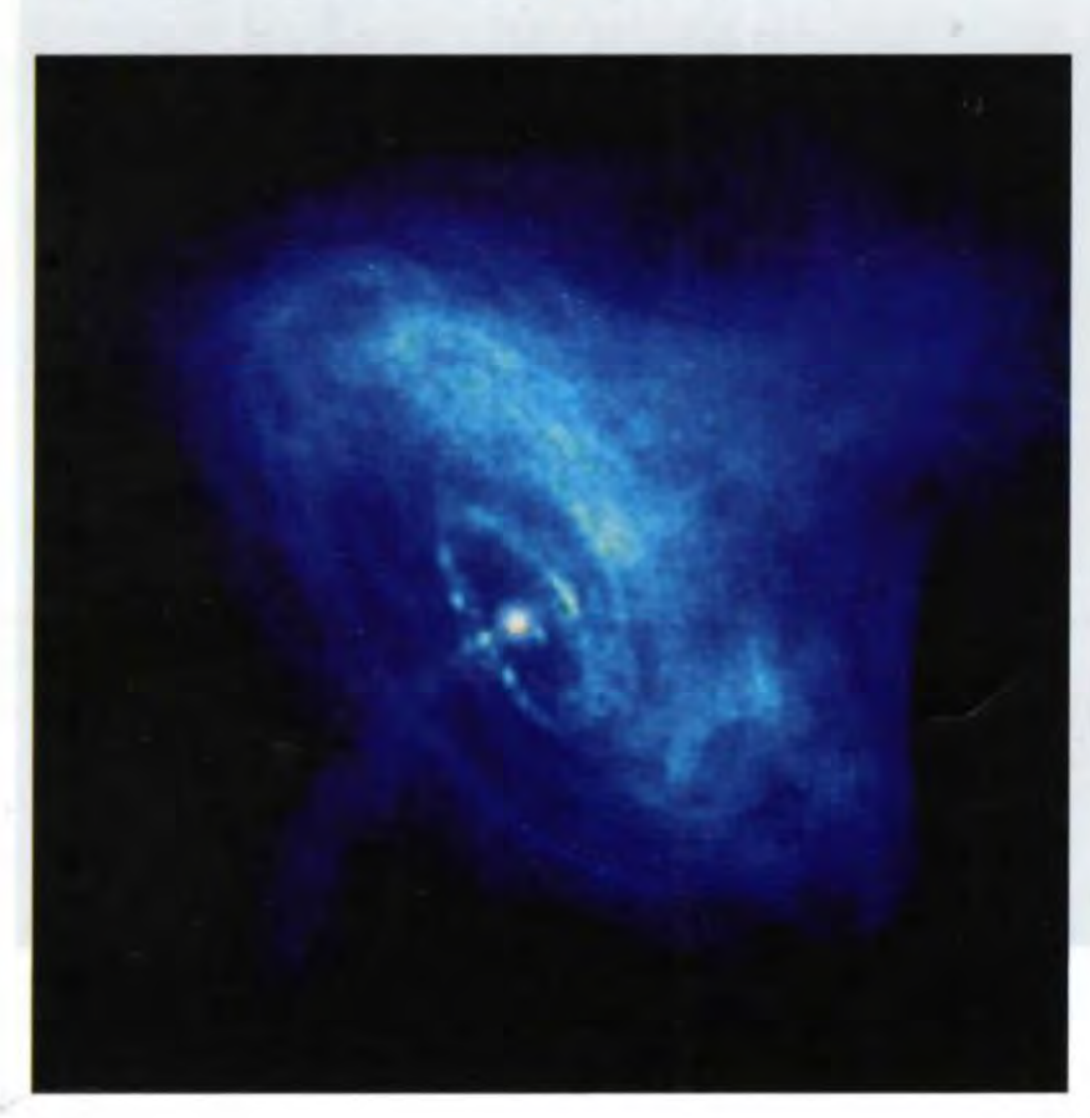
سديم السرطان أو (ميسييه ١) على بُعد ستة آلاف سنة ضوئيَّة، وهو بقايا انفجار (سوبرنوڤا) تم رصده من الأرض عام ١٠٥٤، وفى مركزه يوجد نجم نيوترونىّ يدور حول نفسه بمعدل ثلاثين دورة فى الثانية. انظر [السوبرنوڤا]



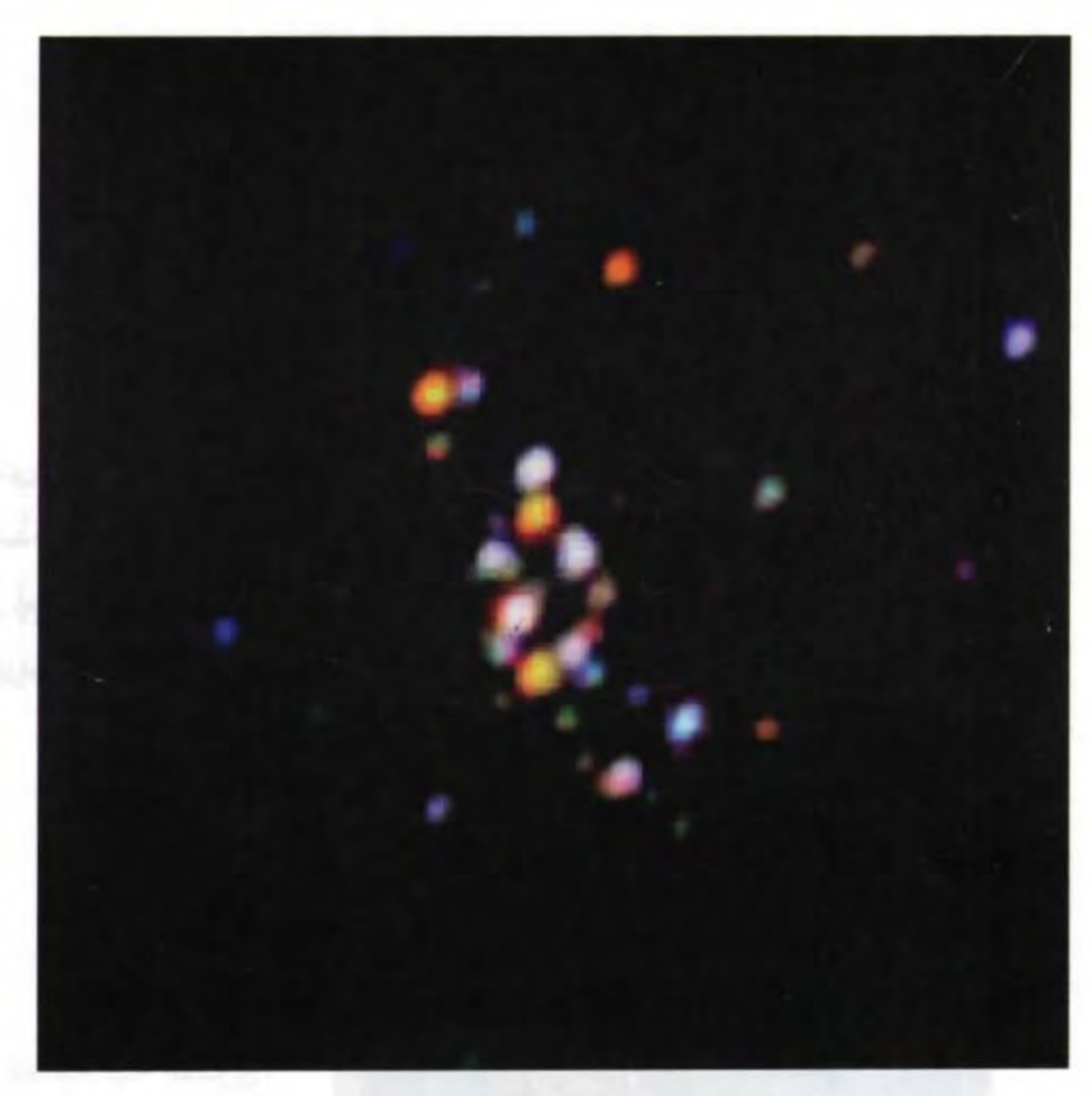
بقايا الانفجار (السوبرنوفا) الذى رصده (تايكو براه) عام ١٥٧٢، والتُقطت هذه الصورة عام ٢٠٠٠ بالقمر الصناعىّ (إكس إم إم نيوتن) فى نطاق أشعة (إكس). انظر [السوبرنوفا]



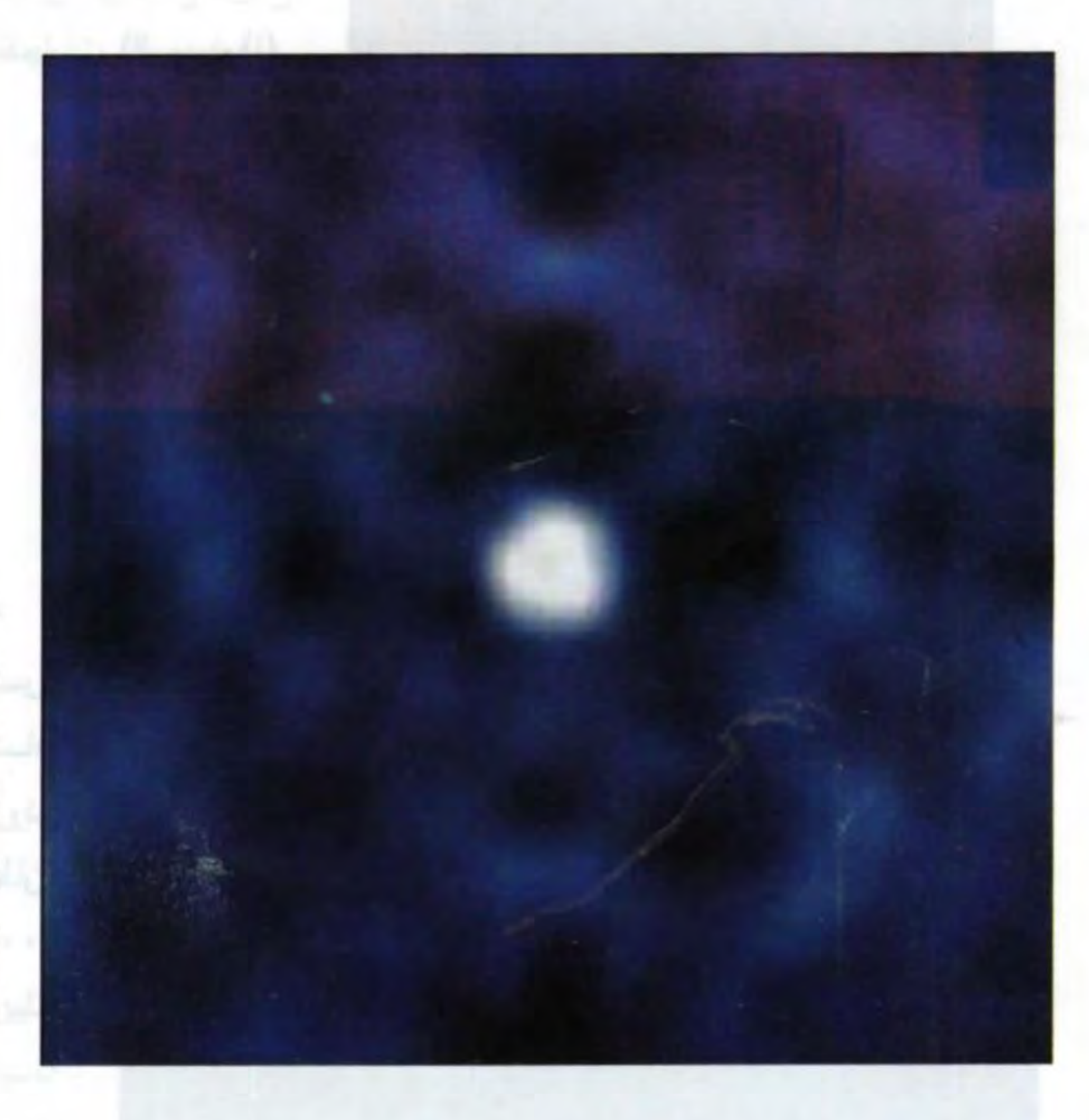
السديم (إن ٧٠) فى السحابة الماجِلَّانيَّة الكبرى؛ إنها على هيئة كرة هائلة من الغاز بين النجمىّ قطرها ثلاثمائة سنة ضوئية، وهى من نتاج الرياح النجميَّة للنجوم كبيرة الكتلة وانفجارات (السوبرنوفا). انظر [التحليل النووى]



صورة فى نطاق أشعة (إكس) لانبعاثات المادة والمادة المضادة المنطلقة من النجم النيوترونىّ الموجود فى مركز سديم السرطان. تم التقاط هذه الصورة عام ٢٠٠٢ بالقمر الصناعى (شاندرا)، ويبلغ قطر الحلقة المركزية نحو سنة ضوئيَّة. انظر [النجوم النيوترونية]



صورة للمجموعة النجميَّة الكُرِّية (إن جى سى ٦٢٦٦)، التقطها القمر الصناعىّ (شاندرا) فى نطاق أشعة (إكس). ومعظم النقاط المرئية هى نُظُم ثُنائيَّة يضم كلٌّ منها إما متقزمًا أبيض، أو نجمًا نيوترونيًّا يلتهم المادة من رفيقه. انظر [مصادر أشعة (إكس)]

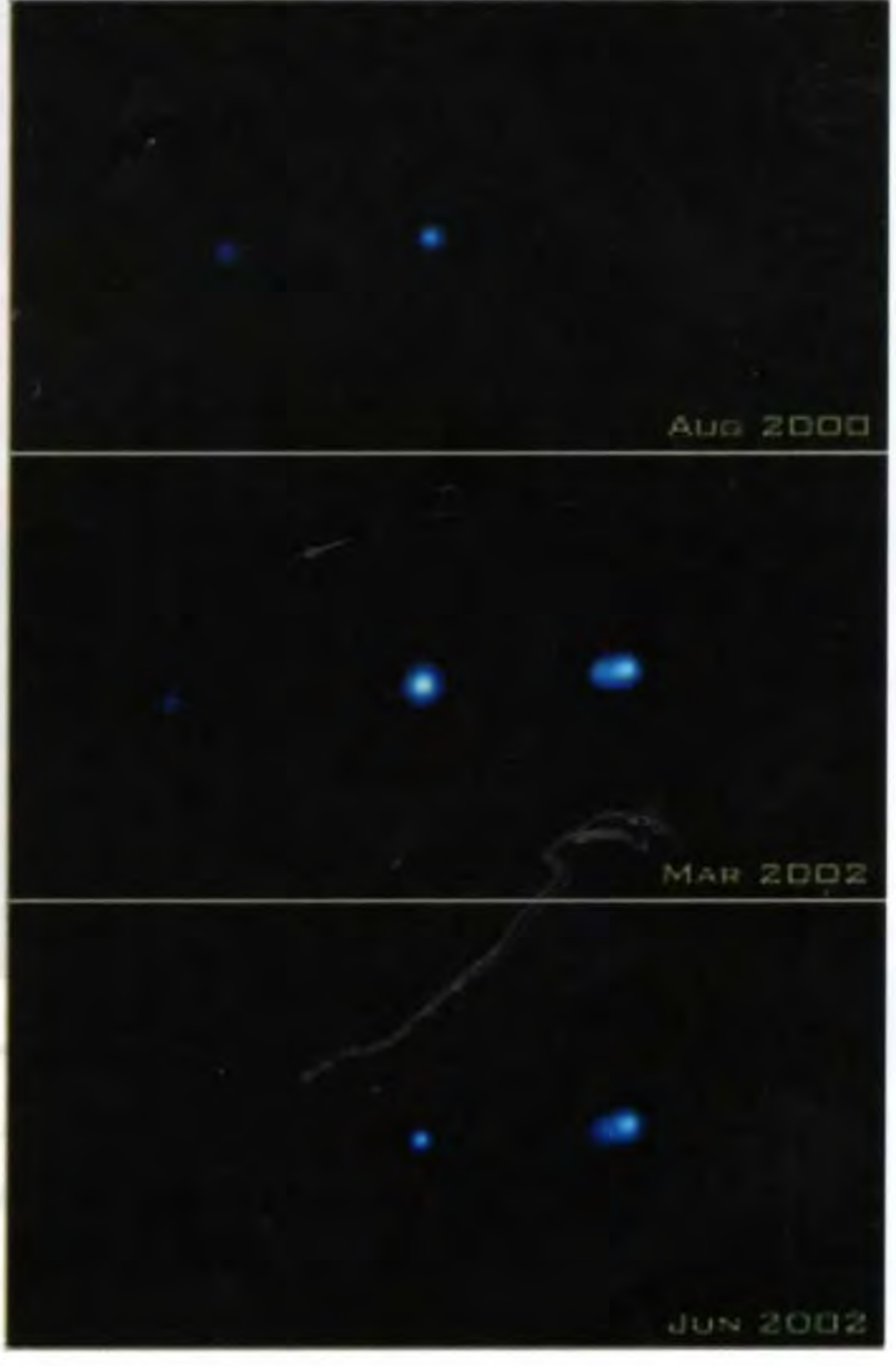


رشقات (جى آر بى ٠٢١١٢٥) التى تم رصدها فى نطاق أشعة (جاما) بالقمر الصناعىّ المشترك للوكالة الفضائية الأوروبية ESA. ومصدر هذه الرشقات موجود على بعد خمسة مليارات سنة ضوئيَّة من الأرض. انظر [رشقات أشعة جاما]



المِدْخال الفرنسىّ الإيطالىّ (فيرجو) قرب (بيزا) ويتكوَّن من ذراعين متعامدين بطول ثلاثة كيلومترات، ويَستخدم هذا الجهاز مبدأ مدخال (مايكلسون) لقياس التغيُّرات النسبية متناهية الدقَّة للأذرع الناجمة عن تعرُّضها للموجات الجَذْبوِيَّة. انظر [الموجات الجذبوية]





الثقب الأسود (إكس تى أى چى١٥٥٠٥٦٤) الذى رصده مَرْصَد (شاندرا) فى نطاق الأشعة تحت الحمراء. وهذا الثقب الأسود ينتمى إلى منظومة ثنائية طرفها الآخر نجم عادىّ يفقد شيئًا فشيئًا الغاز الذى يتجه إلى تكوين قرص حول الثقب الأسود. وترتفع درجة حرارة هذا الغاز بسبب الاحتكاك لتصل إلى عدة ملايين درجة مئوية؛ الأمر الذى يؤدى بشكلٍ دورىّ إلى انبعاث دفقات من الجسيمات ذات طاقة هائلة، فى اتجاهات متعامدة على القرص. وهذه الصور الثلاث الملتقطة فى أغسطس من عام ٢٠٠٠ ومارس ويونيه من عام ٢٠٠٢، تبين الثقب الأسود بالمركز ثم دفقتين من الجسيمات تبتعدان بسرعة تعادل نصف سرعة الضوء. انظر [الثقوب السوداء]

رؤية تخيُّلية لموت نجم على مقربة من ثقب أسود؛ فمن شأن قوى المَدِّ والجَزْر التى يسببها الثقب الأسود أن تؤدى إلى تعرُّض النجم لانقباضات وانبعاجات حتى يتفكك ويحرر الغاز الذى يكوِّنه. وليس هذا بتفسير نظرىّ بحت، فقد تم بالفعل رصد هذه الظواهر فى مجال الأشعة السينية بالقمر الصناعىّ (إكس إم إم) و(شاندرا) فى عام ٢٠٠٤ فى مركز المَجرَّة (آر إكس چى ١٢٤٢ ١١). انظر [ما حول الثقب الأسود]



الثقب الأسود الافتراضى (الدَّجاجة ـ إكس ١) الذى تم رصده عام ٢٠٠٢ فى نطاق أشعة (إكس) من القمر الأوروبى المشترك. و(الدجاجة . إكس ١) يبدو معزولًا للغاية فى هذه الصورة؛ لأن النجوم القريبة منه كلها نجوم عادية ولا تصدر منها انبعاثات فى هذا النطاق من الطول الموجىّ. والواقع أن (الدجاجة . إكس ١) ليس جرمًا منعزلًا؛ بل إنه ينتمى إلى منظومة مزدوجة مع نجم فوق متعملق أزرق اسمه (إتش دى أى ٢٢٦٨٦٨). والغاز المنتزَع من هذا النجم فوق المتعملق هو الذى يبثُّ الانبعاثات فى نطاق أشعة (إكس) وهو فى سبيله للابتلاع فى الثقب الأسود. انظر [رصد الثقوب السوداء]



يحمل هذا السديم الانعكاسىّ اسم (إن چى سى ١٩٩٩)، وهو لا يبثُّ ضوءًا بذاته لكن يعكس ضوء النجم اللامع الموجود فى جوفه. والبقعة السوداء أمام (إن چى سى ١٩٩٩) هى سحابة باردة من الغاز والغبار تحجب ضوء السديم وتبدو بالتالى قاتمة للغاية. انظر [الغبار بين النجمىّ]



سديم رأس الحصان الموجود على بُعد ألفٍ وأربعمائة سنة ضوئية، والسديم مائل إلى الحُمْرة وهو منطقة (إتش تو) للغاز المتأيِّن تحمل اسم (أى سى ٤٣٤)، والمنطقة القاتمة هى سحابة من الغبار تُسمى (بارنارد ٣٣). انظر [الغاز بين النجمىّ]

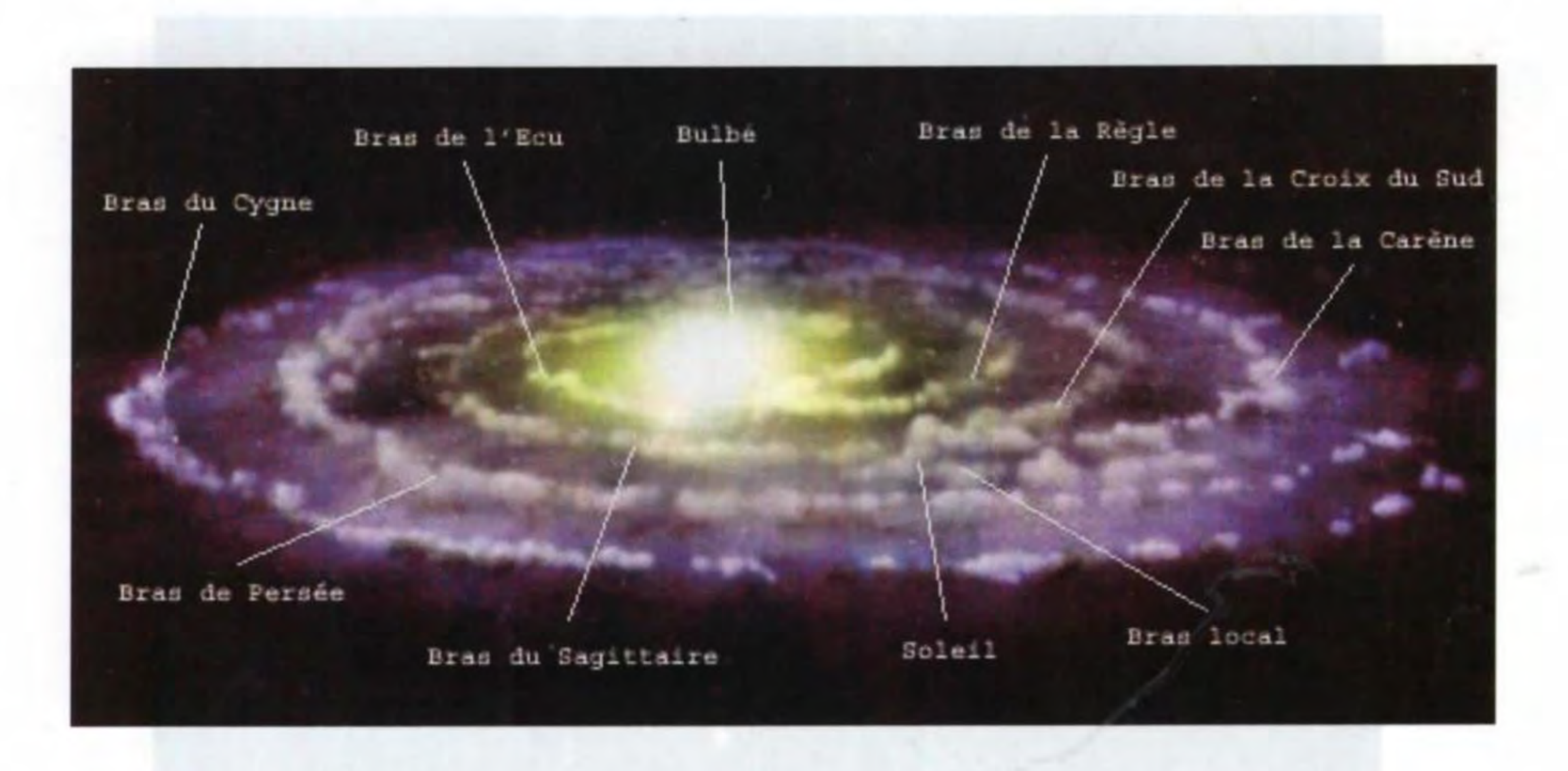


(بانارد ٦٨) هو كرة من الغاز والغبار توجد على بعد أربعمائة وعشر سنوات ضوئية وحرارتها ست عشرة درجة كلفين، وكتلتها تصل إلى مثْلَىْ كتلة الشمس، ومقاسها اثنا عشر ألفًا وخمسمائة وحدة فلكية وقوى الجاذبية والضغط بها لا تزال متوازنة؛ لكن عمليات الرصد تبين أن السحابة معرَّضة فى أى وقت لأن تنهار على نفسها لتُسْفر عن مولد نجم جديد. انظر [نشأة النجوم]



نموذج لأجرام (هربيچ هارو إتش إتش٣٢).

مشهد خلَّاب لمجرَّتنا درب التبَّانة فى الصيف. انظر [دراسة تاريخية لدرب التبانة]



رؤية تخيُّلية للمجرة مستوحاة من عمليات رصد فى نطاق الأشعة تحت الحمراء وموجات الراديو.
انظر [المجرة]



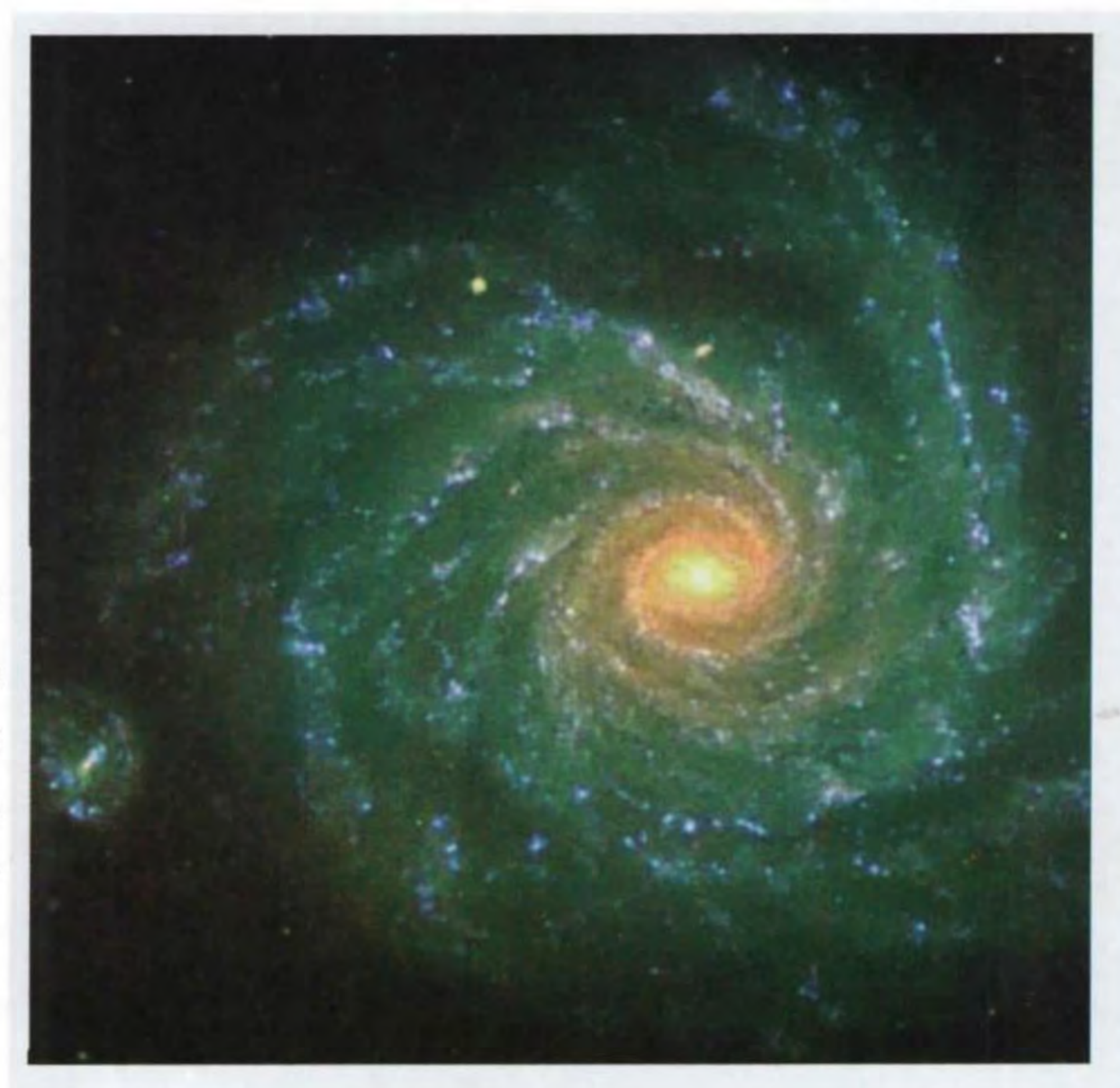
مشهد فى اتجاه مركز دِرب التبانة فى كوكبة القَوْس. انظر [المركز المَجَرِىّ]



صورة للمركز المَجَرِىّ ملتقطة من (شاندرا) قمر الرصد فى نطاق أشعة (إكس)، وفى المركز يمكن تبيُّن (القوس ـ أ) والثقب الأسود فى مركز المجرة، بكتلة تناهز نحو ثلاثة ملايين مثل كتلة الشمس. والخط القُطْرى يوضح مستوى المجرة، والمناطق التى تبدو يميل لونها إلى الحُمْرة هى مناطق واسعة من الغاز تمتد لعشرات السنوات الضوئية وتبلغ حرارتها عشرين مليون درجة. انظر [المركز المَجَرِىّ]



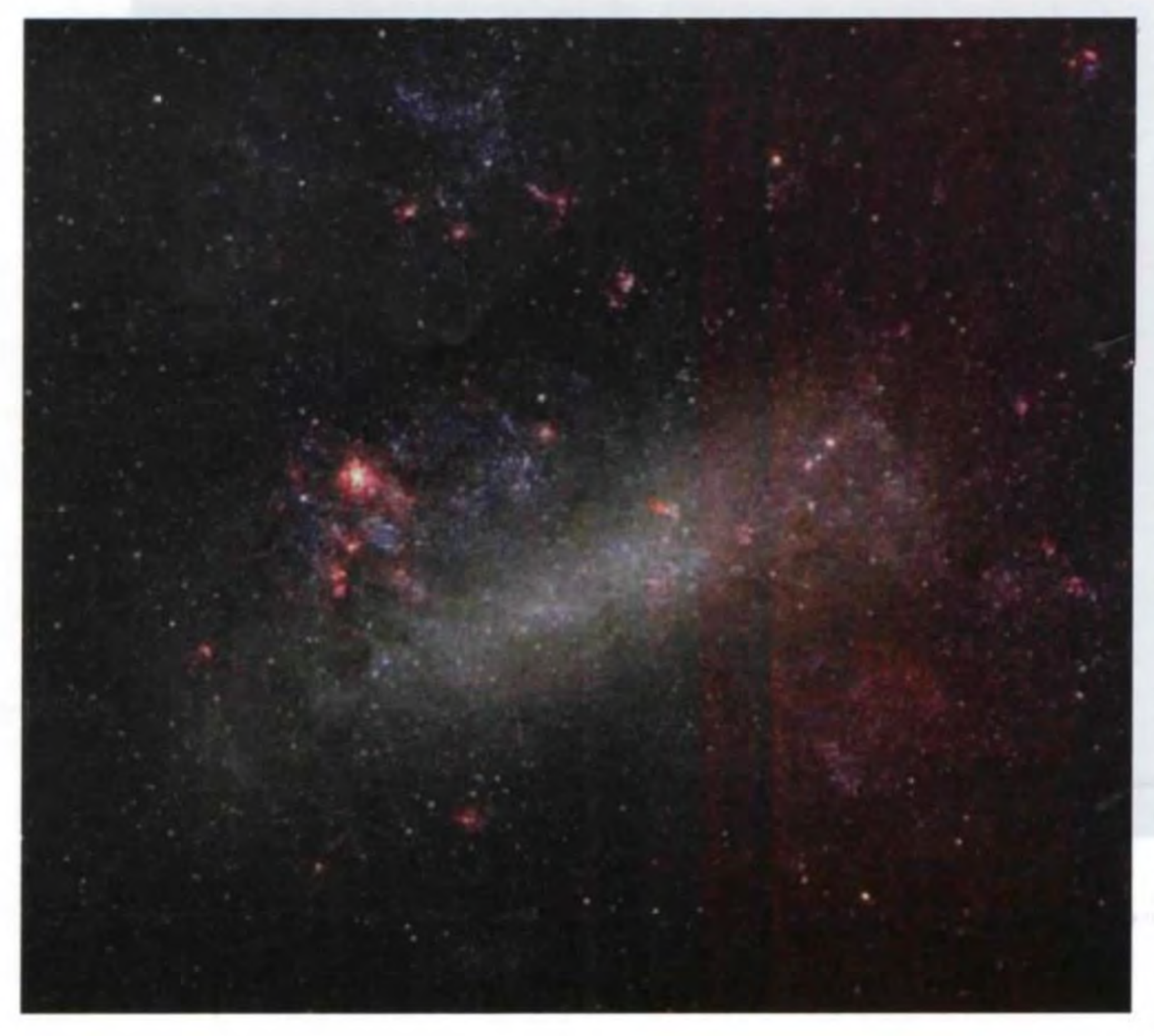
المجرة البيضويَّة (إن چى سى ١١٣٢) على نحو ما رصدها المِرْقَب الفضائى (هابل). انظر [مختلف أنواع المجرات]



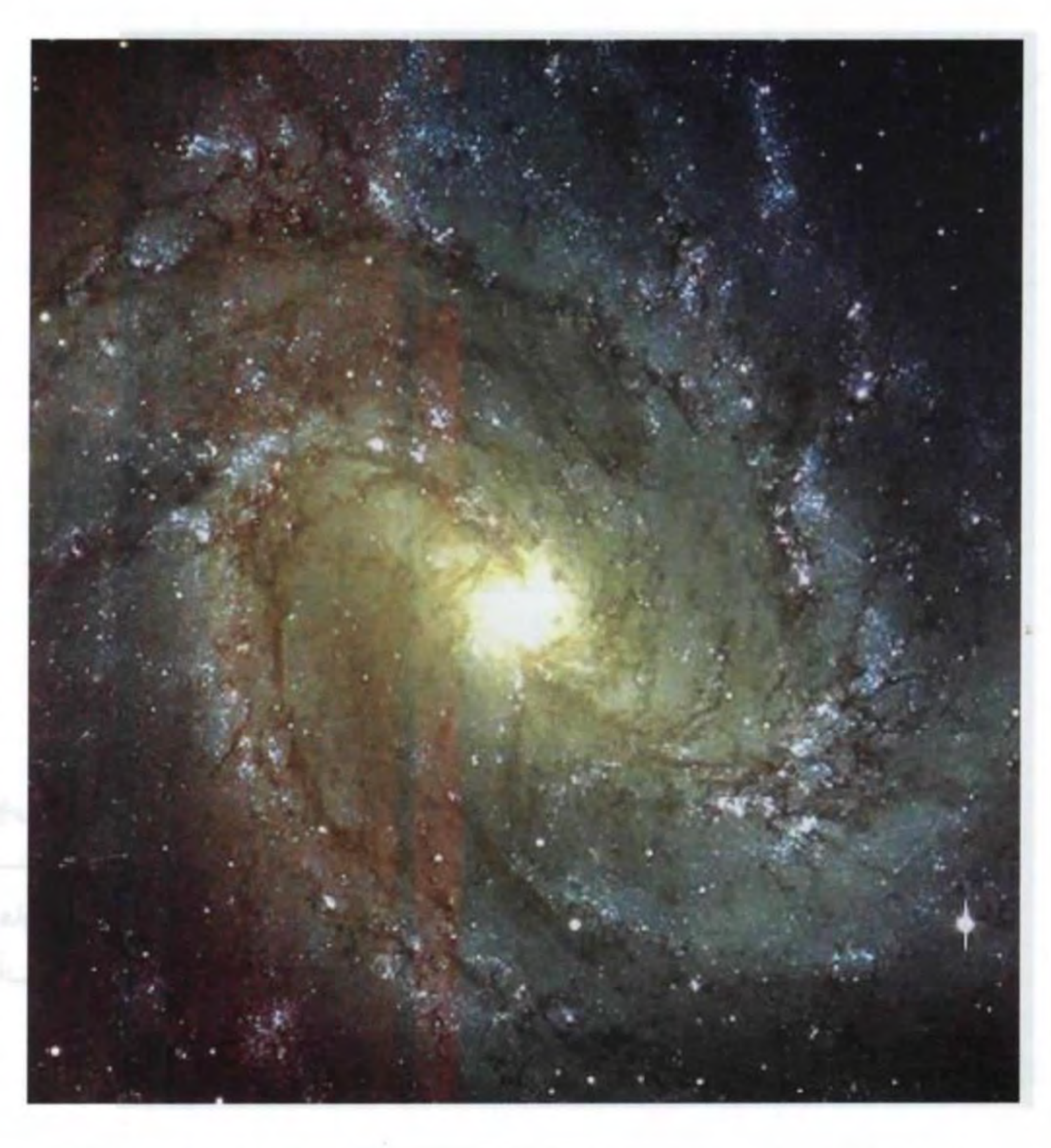
المجـرة الحلزونيَّـة (إن چـى سى ١٢٣٢) على بُعد مائة مليون سنة ضوئية، وبقطر يناهز مائَتَىْ ألف سنة ضوئية فى كوكبة النهر. انظر [مختلف أنواع المجرات]



المجرة العَدَسيَّة (إن چى سى ٥٨٦٦) حسبما صورها المِرْقَب الفضائىّ (هابل). انظر [مختلف أنواع المجرات]



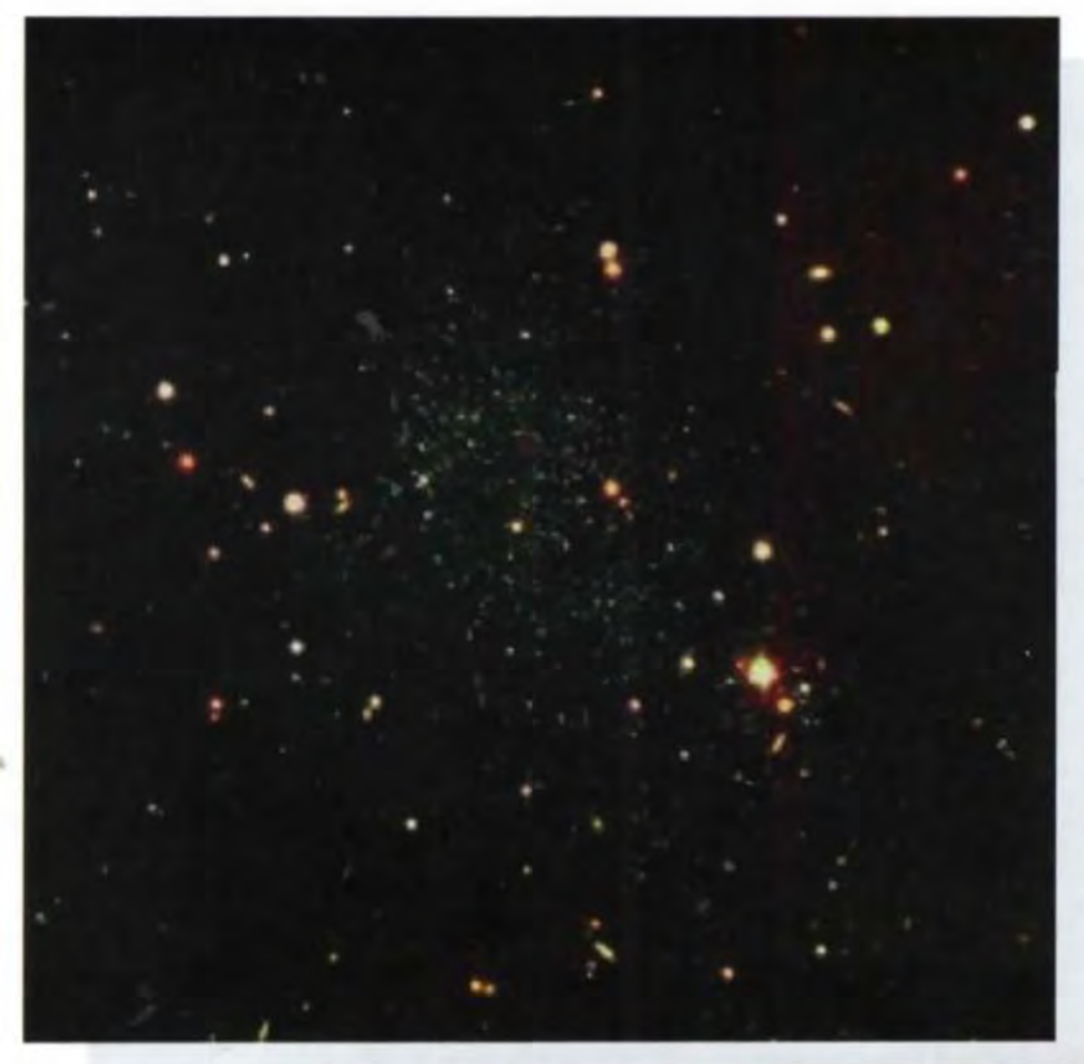
السحابة الماجِلَّانيَّة الكبرى وهى المَجرَّة غير المنتظمة التابعة لمجرتنا درب التبانة والموجودة على بعد مائة وستين ألف سنة ضوئية من الأرض، والتى يصل قطرها إلى نحو ثلاثين ألف سنة ضوئية. انظر [مختلف أنواع المجرات]



المجـــرة الحلزونيَّـــة القضـيبيَّة (ميسـييه٣٣) الموجـودة علـى بُعـد خمسة عشر مليون سنة ضـوئية فـى كوكبـة الحُوَيَّـة. انظـر [الأذرع الحلزونيَّة]



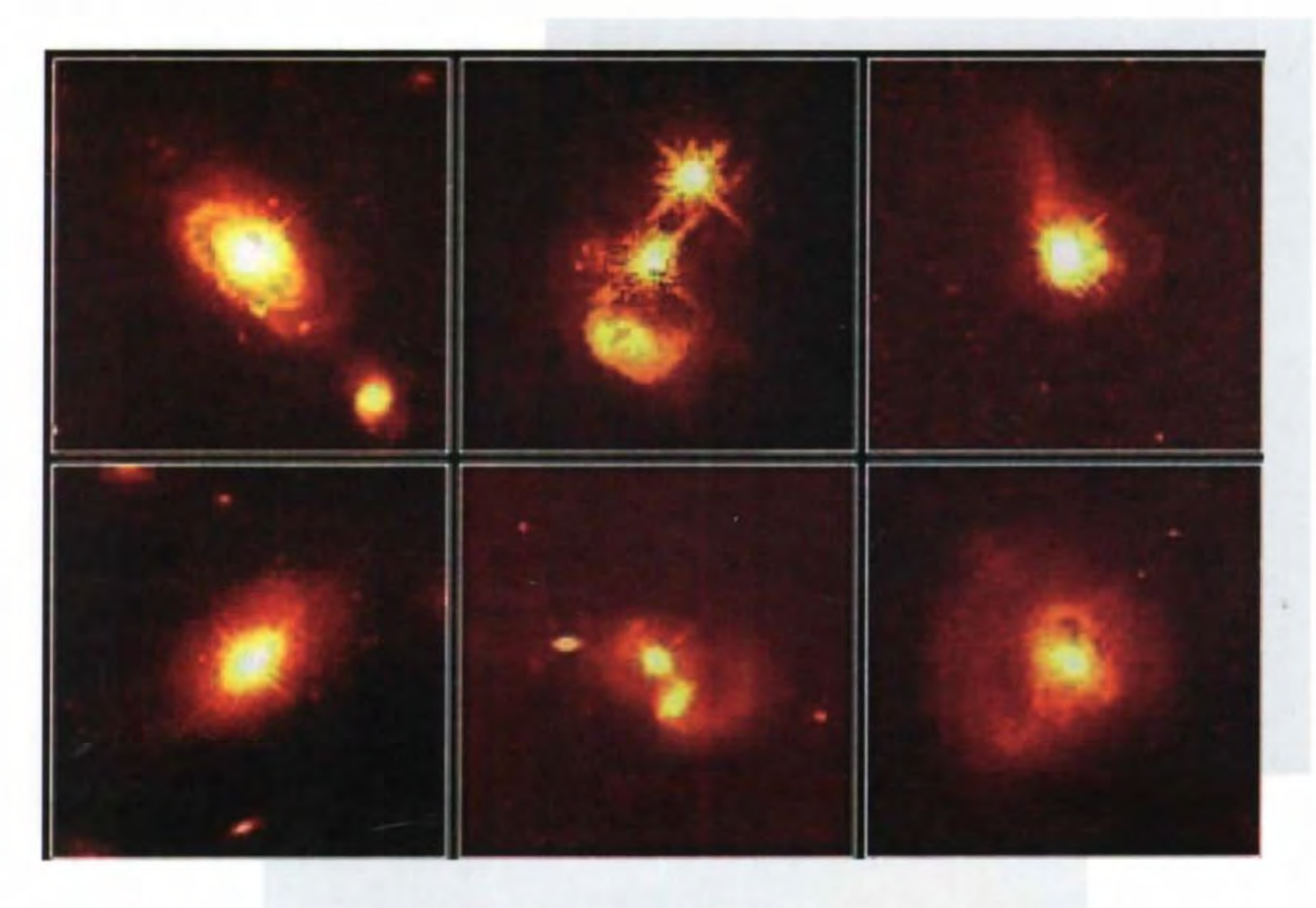
المجرة الحلزونية (إن چى سى ١٣٥٠) كما رصدها المِرْقَب فائق الاتساع عام ٢٠٠٥. انظر [الأذرع الحلزونيَّة]



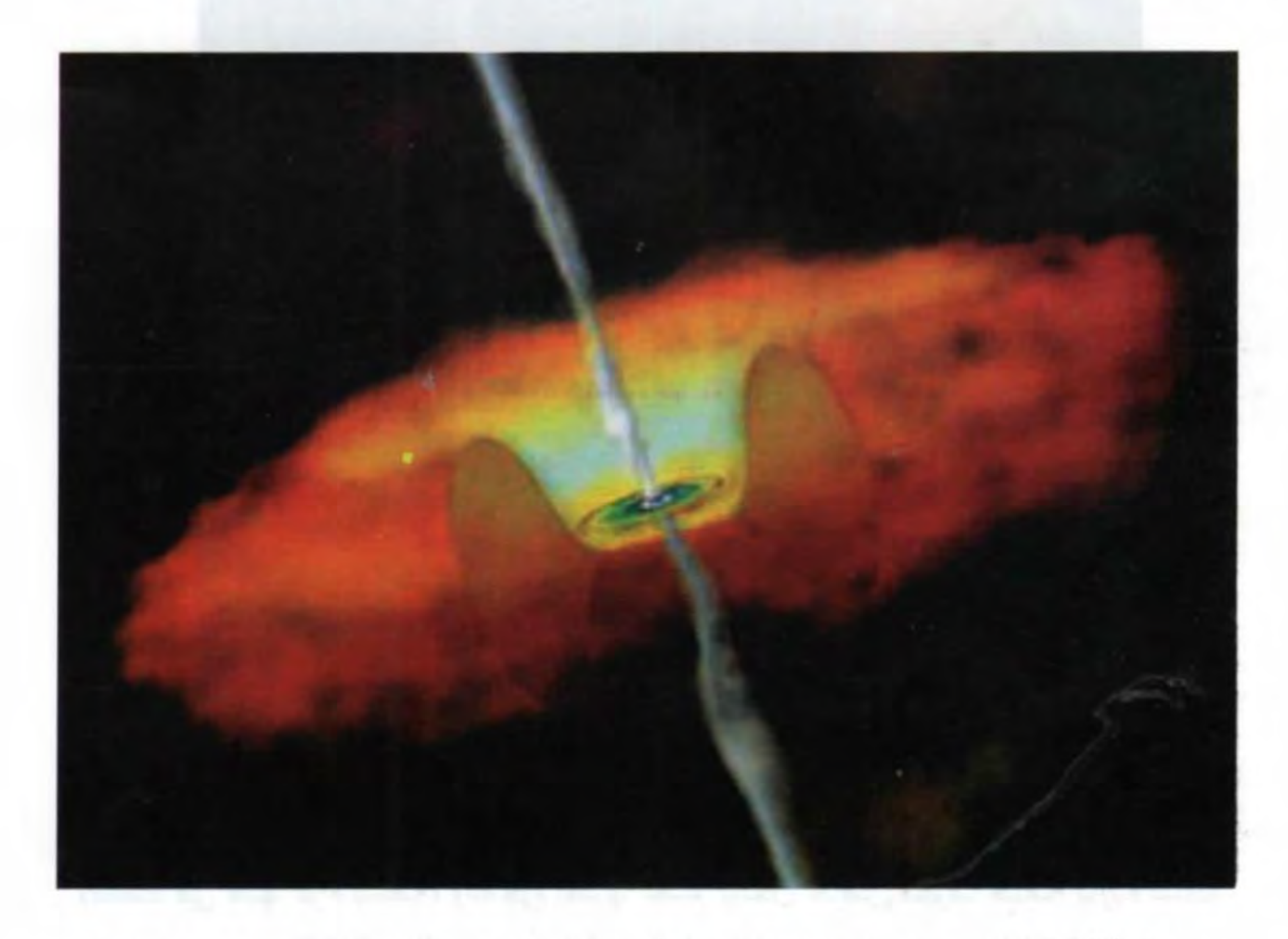
نموذج من المَجرَّات المتقزِّمة تم اكتشافه عام ١٩٨٥ فى كوكبة (مُفرغة الهواء) فى القبَّـة السـماويَّة الجنوبيَّـة، وتلـك المجـرة المكتشفة عبر المِرْقَب فائق الاتساع لها شكلٌ وَتِدِىٌّ أكثر مما هو بيضوىٌّ، وتنتمى لمجرات المجموعـة المحليَّة وتضـم نحـو مليون نجم قديم. انظر [المجرات المتقزمة والمجرات المتعملقة]



المجرة البيضويَّة العملاقة (ميسييه ٨٧) الموجودة على بعد خمسين مليون سنة ضوئية. وتمتلك فى قلبها نواة نشطة، والمجرة نفسها تضم بشكل خاص نجومًا قديمة باردة نسبيًّا وتبدو من ثَمَّ مائلة إلى الحُمرة. وبالأزرق يظهر انبعاث مشحون بالطاقة بشدة من الإلكترونات وجسيمات أخرى، وهذا الانبعاث نابع من النواة ويبثُّ بشكل خاص فى نطاق اللون الأزرق والأشعة فوق البنفسجية. انظر [المجرات ذات النواة النشطة]



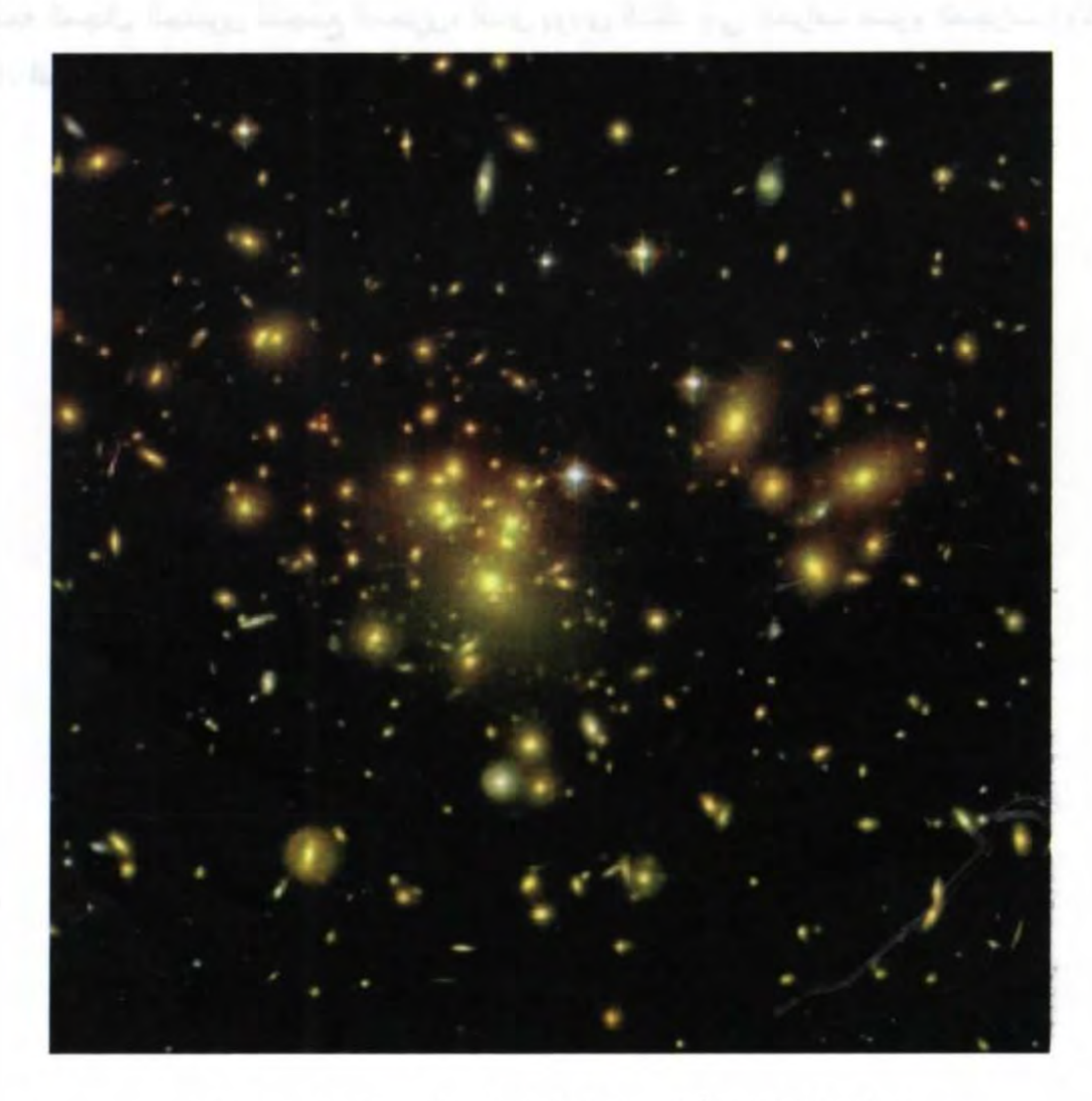
نموذج من الكوازارات، المصادر الراديويَّة للأجرام شبه النجمية يعيش فى بيئات شديدة الاختلاف، بعضها فى مجرات منعزلة وبعضها فى مجرات فى حالة اندماج. انظر [الكوازارات]



صورة تَخيُّليَّة لمركز مَجرَّة نشطة. الثقب الأسود المركزىّ محاط بقرص من الغاز الساخن وبحزام هائل من الغاز والغبار الأكثر برودةً. ويمكننا كذلك تبيُّن انبعاثيْن للجُسَيْمات المشحونة بالطاقة. انظر [النموذج الموحد للمجرات النشطة]



اصطدام بين المَجرَّتيْن الحَلزونيَّتيْن (إن چى سى ٢٢٠٧) إلى اليسار و (أى سى ٢١٦٣) إلى اليمين. ونلحظ أن المجرة الثانية تغير بالفعل شكلها بشدة بسبب الاصطدام، وفقدت بشكل سريع بعضًا من نجومها وغازها. انظر [اندماج المجرات]



تجمُّع المَجَرَّات (أبيل ١٦٨٩). انظر [تجمعات المجرات]



مشهد للتجمُّع المَجَرِىّ (أبيل ٢٢١٨). والأشكال التى نراها على شكل أقواس هى خداع بصرىّ صنعه المجال الجذبوىّ للتجمُّع المَجَرِىّ، الذى يؤدى كذلك إلى انحراف ضوء المجرات الأكثر بُعدًا. انظر [تجمعات المجرات]

صدر فى الالف كتاب الثانى

• أولاً: الموسوعات والمعاجم

ليونارد كوتريل، **الموسوعة الأثرية العالمية**
وليام بيتر، **معجم التكنولوجيا الحيوية**
ج. كارفيل، **تبسيط المفاهيم الهندسية**
ب. كوملان، **الأساطير الإغريقية والرومانية**
و.د. هاملتون وآخرون، **المعجم الجيولوجى المصور فى المعادن والصخور والحفريات**
حسام الدين زكريا، **المعجم الشامل للموسيقى العالمية (٢ ج)**
خيرية البشلاوى، **معجم المصطلحات السينمائية**
دونالد نيكول، **معجم التراجم البيزنطية**
ر. س. زينر، **موسوعة الأديان الحية (٢ ج)**
أمير العزب، **قاموس أشهر الأفعال المركبة**

• ثانيًا: الدراسات الاستراتيجية وقضايا العصر

د.محمد نعمان جلال، **حركة عدم الانحياز فى عالم متغير**
إريك موريس،آلان هو، **الإرهاب**
د. ممدوح عطية، **البرنامج النووى الإسرائيلى والأمن القومى العربى (ط٢)**
د. لينوار تشامبرز رايت، **سياسة الولايات المتحدة الأمريكية إزاء مصر**
إزرا .ف. فوجل، **المعجزة اليابانية**
د.السيد نصر ، **إطلالات على الزمن الآتى**
بول هاريسون، **العالم الثالث غدًا**
أقطاب العلماء الأمريكيين، **مبادرة الدفاع الاستراتيجى: حرب الفضاء**
و. مونتجمرى وات، **الإسلام والمسيحية فى العالم المعاصر**
بادى أونيمود، **أفريقيا الطريق الآخر**
فانس بكارد، **إنهم يصنعون البشر (٢ ج)**
مارتن فان كريفلد، **حرب المستقبل**
ألفين توفلر، **تحول السلطة (٢ ج)**
ممدوح حامد عطية، **إنهم يقتلون البيئة**
د.السيد أمين شلبى، **جورج كينان**
يوسف شرارة، **مشكلات القرن الحادى والعشرين والعلاقات الدولية**
د. السيد عليوة، **إدارة الصراعات الدولية**
د. السيد عليوة، **صنع القرار السياسى**
جرج كاشمان، **لماذا تنشب الحروب(٢ ج)**
إيمانويل هيمان، **الأصولية اليهودية**
آلان أنترمان، **اليهود (عقائدهم الدينية وعباداتهم)**
د. ممدوح عطية وأخرون، **البرنامج النووى الإيرانى والمتغيرات فى أمن الخليج**
أنجيلو كودفيللا، **المخابرات وفن الحكم**
بريدراج ماتفيجيفتش، **تراتيل متوسطية**
نعوم تشومسكى، **مداخلات: آراء حرة فى السياسات الأمريكية المعاصرة**
هيكتور كوادرا- مونتيل، **العولمة نحو تنوع المنهج.**
دانتى أ. كابونيرا، **المياه فى الأنظمة التشريعية والإدارية العالمية والمحلية.**
ريتشارد هايدريان، **كيف خذلت الرأسمالية العالم العربى**
ولفريد هـ. وايتلى، **اللغة فى كينيا**

• ثالثًا: العلوم والتكنولوجيا

ميكائيل ألبى، **الانقراض الكبير**
فيرنر هيزنبرج، **الجزء والكل: محاورات فى مضمار الفيزياء الذرية**

(*) قائمة مصنفة وموجزة بالكتب التى صدرت فى مشروع الألف كتاب الثانى، ولمزيد من البيانات يمكن الرجوع إلى قائمة المشروع بموقع الهيئة المصرية العامة للكتاب WWW.gebo.gov.eg

فريد هويل، **البذور الكونية**
ويليام بينز، **الهندسة الوراثية للجميع**
د. جوهان دورشنر، **الحياة فى الكون كيف نشأت وأين توجد**
إسحق عظيموف، **الشموس المتفجرة (أسرار السوبرنوفا)**
روبرت لافور، **البرمجة بلغة السى باستخدام تيربوسى (٢ج)**
إدوارد إيه فايجينباوم، **الجيل الخامس للحاسوب**
د. محمود سرى طه، **الكمبيوتر فى مجالات الحياة**
د. مصطفى عنانى، **الميكروكمبيوتر**
ى.رادو نسكاياى، **الإلكترونيات والحياة الحديثة**
جلال عبد الفتاح، **الكون ذلك المجهول**
إيفرى شاتزمان، **كوننا المتمدد**
فرد س. هيس، **تبسيط الكيمياء**
كاتى ثير، **تربية الدواجن**
د. محمد زينهم، **تكنولوجيا فن الزجاج**
لارى جونيك ومارك هويليس، **الوراثة والهندسة الوراثية بالكاريكاتير**
جينا كولاتا، **الطريق إلى دوللى**
دور كاس ماكلينتوك، **صور أفريقية: نظرة على حيوانات أفريقيا**
إسحق عظيموف، **أفكار العلم العظيمة**
د. مصطفى محمود سليمان، **الزلازل**
بول دافيز، **الدقائق الثلاث الأخيرة**
ويليام هـ . ماثيوز، **ما هى الجيولوجيا؟**
إسحق عظيموف، **العلم وآفاق المستقبل**
ب.س. ديفيز، **المفهوم الحديث للمكان والزمان**
د. محمود سرى طه، **الاتجاهات المعاصرة فى عالم الطاقة**
بانش هوفمان، **آينشتين**
زافيلسكى ف.س.، **الزمن وقياسة**
د. فاضل أحمد الطائى، **أعلام العرب فى الكيمياء**
ر.ج.فوربس، **تاريخ العلم والتكنولوجيا (٢ج)**
رولاند جاكسون، **الكيمياء فى خدمة الإنسان**
إبراهيم القرضاوى، **أجهزة تكييف الهواء**
ديفيد ألدرتون، **تربية أسماك الزينة**
أندريه سكوت، **جوهر الطبيعة**
إيجور إكيموشكين، **الإيثولوجى**
بارى باركر، **السفر فى الزمان الكونى**
ديمترى ترايفونوف، **ظلال الكيمياء**
بول ديفز، جونز جريبين، **أسطورة المادة**
جيفرى ماوساييف ماسون، **حين تبكى الأفيال**
ليونارد كول، **السلاح الحادى عشر**
و. جراهام ريتشاردز، **أسرار الكيمياء**
د. زين العابدين متولى، **وبالنجم هم يهتدون**
د.كامل زكى حميد، **الاستنساخ قنبلة بيولوجية**
فلاديمير سميلجا، **النسبية والإنسان**
د. محمد فتحى عوض الله، **رحلات جيولوجية فى صحراء مصر الشرقية**
ليونيد بونوماريف، **الاحتمالات المثيرة للنظرية الكمية**
جون جريبين، **الحياة السرية للشمس**
تيموثى جولد سميث، **الأصول البيولوجية للسلوك البشرى**
فيليب فرانك، **بين الفيزياء والفلسفة**
فريد هويل، شاندرا ويكراماسينج، **سحابة الحياة (أصل الحياة فى الكون)**
كيفن واريك، **أساسيات الذكاء الاصطناعى**
روبرت شيلدريك، **استحضار الماضى (تماثل الأشكال وعادات الطبيعة)**
اوليفييه اسلانجيه، **مقدمة فى علم الفلك.**
إى.آى بارنوف، **اللانهايات...... إلى أين؟**

- **رابعًا: الاقتصاد**

ديفيد وليام ماكدويل، **مجموعات النقود (صيانتها، تصنيفها، عرضها)**
د. نورمان كلارك، **الاقتصاد السياسى للعلم والتكنولوجيا**
سامى عبد المعطى، **التخطيط السياحى فى مصر**
جابر الجزار، **ماستريخت والاقتصاد المصرى**
ولت ويتمان روستو، **حوار حول التنمية الاقتصادية**
فيكتور مورجان، **تاريخ النقود**
ليستر ثورو، **مستقبل الرأسمالية**
د. ناصر جلال، **حقوق الملكية الفكرية**

- **خامسًا: مصر عبر العصور**

محرم كمال، **الحكم والأمثال والنصائح عند المصريين القدماء**
فرانسوا ديماس، **آلهة مصر**
سيريل ألدريد، **إخناتون**
موريس بيرابر، **صناع الخلود**
بكنت أ. كتشن، **رمسيس الثانى: فرعون المجد والانتصار**
ألن شورتر، **الحياة اليومية فى مصر القديمة**
ونفرد هولمز، **كانت ملكة على مصر**
جاك كرابس جونيور، **كتابة التاريخ فى مصر**
نفتالى لويس، **مصر الرومانية**
عبده مباشر، **البحرية المصرية من محمد على للسادات (١٨٠٥-١٩٧٣)**
د. السيد طه أبو سديرة، **الحرف والصناعات فى مصر الإسلامية**
جابريل باير، **تاريخ ملكية الأراضى فى مصر الحديثة**
عاصم محمد رزق، **مراكز الصناعة فى مصر الإسلامية**
ت.ج.هـ. جيمز، **كنوز الفراعنة**
حسن كمال، **الطب المصرى القديم**
أ.أ.س. إدواردز، **أهرام مصر**
سومرز كلارك، **الآثار القبطية فى وادى النيل**
كريستيان ديروش نوبلكور، **المرأة الفرعونية**
بيل شول وأدبنيت، **القوة النفسية للأهرام**
جيمس هنرى برستيد، **تاريخ مصر**
د. بيارد دودج، **الأزهر فى ألف عام (ط٢)**
أ. سبنسر، **الموتى وعالمهم فى مصر القديمة**
ألفريد ج. بتلر، **الكنائس القبطية القديمة فى مصر (٢ج) (ط٢)**
روز أليندم، **الطفل المصرى القديم**
ج. و. مكفرسون، **الموالد فى مصر**
جون لويس بوركهارت، **العادات والتقاليد المصرية من الأمثال الشعبية**
سوزان راتييه، **حتشبسوت**
مرجريت مرى، **مصر ومجدها الغابر**
أولج فولكف، **القاهرة مدينة ألف ليلة وليلة**
د. محمد أنور شكرى، **الفن المصرى القديم**
ت.ج. جيمز، **الحياة أيام الفراعنة**
ايفان كونج، **السحر والسحرة عند الفراعنة**
تشارلز نيمس، **طيبة (آثار الأقصر)**
رندل كلارك، **الرمز والأسطورة فى مصر القديمة**
ديمترى ميكس، **الحياة اليومية للآلهة الفرعونية**
محمد عبد الحميد بسيونى، **بانوراما فرعونية**
حمدى عثمان، **هؤلاء حكموا مصر (ط٢)**
ميكل ونتر، **المجتمع المصرى تحت الحكم العثمانى**
بربارة واترسون، **أقباط مصر (ط٢)**
إيريك هورنونج، **فكرة فى صورة**
بيير جرانديه، **رمسيس الثالث**
محسن لطفى السيد، **أساطير معبد أدفو**
د. نبيل عبيد، **الطب المصرى فى عصر الفراعنة**

بيتر فرانس، **أوريا والآثار المصرية**
ألبرت فارمان، **مصر وكيف غدر بها**

• **سادسًا: الكلاسيكيات**

جاليليو جاليليه، **حوار حول النظامين الرئيسين للكون (٣ج)**
أبوالقاسم الفردوسى، **الشاهنامة (٢ج)**
إدوارد جيبون، **اضمحلال الإمبراطورية الرومانية وسقوطها (٣ج)**
ناصر خسرو علوى، **سفر نامة**
فيليب عطية، **ترانيم زرادشت**
جورج جاموف، **بداية بلا نهاية**
د.رمسيس عوض، **أبرز ضحايا محاكم التفتيش**

• **سابعًا: الفن التشكيلى والموسيقى**

عزيز الشوان، **الموسيقى تعبير نغمى ومنطق**
ألويز جرايتر، **موتسارت**
شوكت الربيعى، **الفن التشكيلى المعاصر فى الوطن العربى**
ليوناردو دافنشى، **نظرية التصوير**
د. غبريال وهبه، **أثر الكوميديا الإلهية لدانتى فى الفن التشكيلى**
روبين جورج كولنجوود، **مبادئ الفن**
مارتن جك، **يوهان سباستيان باخ**
ميخائيل شتيجمان، **فيفالدى**
هيربرت ريد، **التربية عن طريق الفن**
أدامز فيليب، **دليل تنظيم المتاحف**
حسام الدين زكريا، **أنطون بروكنر**
جيمس جينز، **العلم والموسيقى**
هوجولا يختنتريت، **الموسيقى والحضارة**
محمد كمال إسماعيل، **التحليل والتوزيع الأوركسترالى**
د. صالح رضا، **ملامح وقضايا فى الفن التشكيلى المعاصر**
إدموندو سولمى، **ليوناردو**
سيونايد ميرى روبرتسون، **الأشغال الفنية والثقافة المعاصرة**

• **ثامنًا: الحضارات العالمية**

جاكوب برونوفسكى، **التطور الحضارى للإنسان**
س.م. بورا، **التجربة اليونانية**
جوستاف جرونيباوم، **حضارة الإسلام**
أ.د. جرنى، **الحيثيون**
ل. ديلابورت، **بلاد ما بين النهرين**
ج. كونتنو، **الحضارة الفينيقية**
جوزيف نيدهام، **تاريخ العلم والحضارة فى الصين**
ستيفن رانسيمان، **الحضارة البيزنطية (ط٢)**
سبتينو موسكاتى، **الحضارات السامية**

• **تاسعًا: التاريخ**

جوزيف داهموس، **سبع معارك فاصلة فى العصور الوسطى**
هنرى بيرين، **تاريخ أوروبا فى العصور الوسطى**
أرنولد توينبى، **الفكر التاريخى عند الإغريق**
بول كولز، **العثمانيون فى أوروبا**
جوناثان ريلى سميث، **الحملة الصليبية الأولى وفكرة الحروب الصليبية**
د. بركات أحمد، **محمد واليهود**
ستيفن أوزمنت، **التاريخ من شتى جوانبه(٣ج)**
و. بارتولد، **تاريخ الترك فى آسيا الوسطى**
فلاديمير تيسمانيانو، **تاريخ أوروبا الشرقية**
د.ألبرت حورانى، **تاريخ الشعوب العربية(٢ج)**
نويل مالكوم، **البوسنة**
جارى.ب. ناش، **الحمر والبيض والسود**
أحمد فريد رفاعى، **عصر المامون (٢ج)**
آرثر كيستلر، **القبيلة الثالثة عشرة ويهود اليوم**
ناجاى متشيو، **الثورة الإصلاحية فى اليابان**
محمد فؤاد كوبريلى، **قيام الدولة العثمانية**

د. أبرار كريم الله، **من هم التتار؟**
ستيفن رانسيمان، **الحملات الصليبية**
آلبان ويدجرى، **التاريخ وكيف يفسرونه (٢ج)**
جوسيبى دى لونا، **موسولينى**
جوردون تشيلد، **تقدم الإنسانية**
هـ.ج. ولز، **معالم تاريخ الإنسانية (٤ج)**
هـ. سانت موس، **ميلاد العصور الوسطى**
يوهان هويزنجا، **اضمحلال العصور الوسطى**
هـ.ج. ويلز، **موجز تاريخ العالم**
لورد كرومر، **الثورة العرابية**
و. مونتجمرى وات، **محمد فى مكة**
ألبرت براجو، **ثورات أمريكا الإسبانية**
برنابى روجرسون، **ورثة محمد (جذور الخلاف السنى الشيعى)**

• عاشرًا: الجغرافيا والرحلات

ت.و. فريمان، **الجغرافيا فى مائة عام**
ليستردیل رای، **الأرض الغامضة**
رحلة جوزيف بتس (الحاج يوسف)
إميليا إدواردز، **رحلة الألف ميل**
رحلات فارتيما (الحاج يونس المصرى)
رحلة بيرتون إلى مصر والحجاز (٣ج)
رحلة عبد اللطيف البغدادى فى مصر
رحلة الأمير رودلف إلى الشرق (٣ج)
يوميات رحلة فاسكو داجاما
س. هوارد، **أشهر الرحلات إلى غرب أفريقيا**
إريك أكسيلون، **أشهر الرحلات فى جنوب أفريقيا**
وليم مارسدن، **رحلات ماركو بولو (٣ج)**
د. مصطفى محمود سليمان، **رحلة فى أرض سبأ**

• حادى عشر: الفلسفة وعلم النفس

جون بورر، **الفلسفة وقضايا العصر (٣ج)**
سوندراى، **الفلسفة الجوهرية**
جون لويس، **الإنسان ذلك الكائن الفريد**
سدنى هوك، **التراث الغامض: ماركس والماركسيون**
إدوارد دو بونو، **التفكير المتجدد**
رونالد دافيد لانج، **الحكمة والجنون والحماقة**
د. توماس أ. هاريس، **التوافق النفسى: تحليل المعاملات الإنسانية**
د. أنور عبد الملك، **الشارع المصرى والفكر**
نيكولاس ماير، **شارلوك هولمز يقابل فرويد**
أنطونى دى كرسبنى، **أعلام الفلسفة المعاصرة**
جين وروبرت هاندلى، **كيف تتخلصين من القلق؟**
هـ ج. كريل، **الفكر الصينى**
د. السيد نصرالسيد، **الحقيقة الرمادية**
برتراند راصل، **السلطة والفرد**
مارجريت روز، **ما بعد الحداثة**
كارل بوبر، **بحثا عن عالم أفضل**
ريتشارد شاخت، **رواد الفلسفة الحديثة**
جوزيف داهموس، **سبعة مؤرخين فى العصور الوسطى**
د. روجر ستروجان، **هل نستطيع تعليم الأخلاق للأطفال؟**
إريك برن، **الطب النفسى والتحليل النفسى**
بيرتون بورتر، **الحياة الكريمة (٢ج)**
فرانكلين ل . باومر، **الفكر الأوربى الحديث (٤ج)**
هنرى برجسون، **الضحك**
أرنست كاسيرر، **فى المعرفة التاريخية**
و. مونتجمرى وات، **القضاء والقدر**
إدوارد دو بونو، **التفكير العملى**

• ثانى عشر: العلوم الاجتماعية

د. محيى الدين أحمد حسين، **التنشئة الأسرية والأبناء الصغار**
م. و ثرنج، **ضمير المهندس**

رايموند وليامز، **الثقافة والمجتمع**
روى روبرتسون، **الهيروين والإيدز**
بيتر لورى، **المخدرات حقائق نفسية**
د. ليو بوسكاليا، **الحب**
برنسلاو مالينوفسكى، **السحر والعلم والدين**
بيتر ر. داى، **الخدمة الاجتماعية والانضباط الاجتماعى**
بيل جيرهارت، **تعليم المعوقين**
أرنولد جزل، **الطفل من الخامسة إلى العاشرة**
رونالد د. سمبسون، **العلم والطلاب والمدارس**
كارل ساجان، **عالم تسكنه الشياطين**

• ثالث عشر: المسرح

لويس فارجاس، **المرشد إلى فن المسرح**
برونو باشينسكى، **حفلة ماتيكان**
جلال العشرى، **فكرة المسرح**
جان بول سارتر، جورج برناردشو، جان أنوى **مختارات من المسرح العالمى**
د. عبد المعطى شعراوى، **المسرح المصرى المعاصر: أصله وبداياته**
توماس ليبهارت، **فن المايم والبانتومايم**
زيجمونت هيبنر، **جماليات فن الإخراج**
أوجين يونسكو، **الأعمال الكاملة (٢ج)**
آلان ماكدونالد، **مسرح الشارع**
نك كاى، **ما بعد الحداثية والفنون الأدائية**
بيتر بروك، **التفسير والتفكيك والإيديولوجية**
أندرية فيلييه، **الممثل الكوميدى**
لى ستراسبرج، **تدريب الممثل**
جلال جميل محمد، **مفهوم الضوء والظلام فى العرض المسرحى**
أيوجينيو باربا، **زورق من الورق**
الكسندر استروفسكى، **من روائع المسرح الروسى**
رومان رولان، **مسرح الثورة**
أكبر رادى، **من خلف النوافذ**

• رابع عشر: الطب والصحة

بوريس فيدوروفيتش سيرجيف، **وظائف الأعضاء من الألف إلى الياء**
د. جون شندلر، **كيف تعيش ٣٦٥ يوما فى السنة**
د. ناعوم بيتروفيتش، **النحل والطب**
م.هـ. كنج، **التغذية فى البلدان النامية**

• خامس عشر: الآداب واللغة

برتراند رسل، **أحلام الأعلام وقصص أخرى**
ألدس هكسلى، **نقطة مقابل نقطة**
جول ويست، **الرواية الحديثة: الإنجليزية والفرنسية**
أنور المعداوى، **على محمود طه: الشاعر والإنسان**
جوزيف كونراد، **مختارات من الأدب القصصى**
تاجور شين ين بنج وآخرون، **مختارات من الآداب الآسيوية**
محمود قاسم، **الأدب العربى المكتوب بالفرنسية**
سوريال عبد الملك، **حديث النهر**
د. رمسيس عوض، **الأدب الروسى قبل الثورة البلشفية وبعدها**
مختارات من الأدب اليابانى: الشعر، الدراما، الحكاية، القصة القصيرة
ديفيد بشبندر، **نظرية الأدب المعاصر**
نادين جورديمر وآخرون، **سقوط المطر وقصص أخرى**
رالف ئى ماتلو، **تولستوى**
والتر ألن، **الرواية الإنجليزية**
هادى نعمان الهيتى، **أدب الأطفال**
مالكوم برادبرى، **الرواية اليوم**
لوريتو تود، **مدخل إلى علم اللغة**
د. جابرييل جارسيا ماركيز، **سيمون بوليفار أو (الجنرال فى المتاهة)**

ديلاسى أوليرى، **الفكر العربى ومكانه فى التاريخ**
د. على عبد الرءوف البمبى، **مختارات من الشعرالإسبانى فى العصور الوسطى (ج١)**
ب. إفور إيفانز، **موجز تاريخ الدراما الإنجليزية**
ج. س. فريزر، **الكاتب الحديث وعالمه (ج٢)**
جورج ستاينر، **بين تولستوى ودستويفسكى (ج٢)**
ديلان توماس، **مجموعة مقالات نقدية**
فيكتور برومبير، **ستندال (مقالات نقدية)**
فيكتور هوجو، **رسائل وأحاديث من المنفى**
يانكو لافرين، **الرومانتيكية والواقعية**
د. نعمة رحيم الغزاوى، **أحمد حسن الزيات كاتبًا وناقداً**
ف. برميلوف، **دستويفسكى**
لجنة الترجمة بالمجلس الأعلى للثقافة، **الدليل البيليوجرافى: روائع الآداب العالمية (ج١)**
محسن جاسم الموسوى، **عصر الرواية: مقال فى النوع الأدبى**
هنرى باربوس، **الجحيم**
ميجيل دى ليبس، **الفئران**
روبرت سكولز وآخرون، **آفاق أدب الخيال العلمى**
يانيس ريتسوس، **البعيد (مختارات شعرية)**
ب. إيفور ايفانس، **مجمل تاريخ الأدب الإنجليزى**
فخرى أبو السعود، **فى الأدب المقارن**
سليمان مظهر، **أساطير من الشرق**
ف. ع. أدينكوف، **فن الأدب الروائى عند تولستوى**
د. صفاء خلوصى، **فن الترجمة**
بلدوميرو ليلو وآخرون، **قصص من أمريكا اللاتينية**
بورخيس، **مختارات الفانتازيا والميتافيزيقا**
مايكل كانينجهام، **الساعات**
شيكسبير، **سونيتات شيكسبير**
ثريا عريان، **حديقة الياسمين**
د. عبد الغفار مكاوى، **النور والفراشة**
إميل فاچية، **مدخل إلى الأدب**
ألكساندر سولجينيتسين، **يوم فى حياة إيفان دينيسوفيتش**
لورانس فينوتى، **اختفاء المترجم**
عبد الرحمن الخميسى، **الحكايات الشعبية فى آسيا (ج١)**
أنطونيو تابوكى، **سيدة ميناء بيم**
جورج أورويل، **ابنة القس.**
جراهام جرين، **نهاية العلاقة الغرامية**

• سادس عشر: الإعلام

فرانسيس ج. برجين، **الإعلام التطبيقى**
بيير ألبير، **الصحافة**
هربرت ثيلر، **الاتصال والهيمنة الثقافية**

• سابع عشر: السينما

هاشم النحاس، **الهوية القومية فى السينما العربية**
ج. دادلى أندرو، **نظريات الفيلم الكبرى**
روى آرمز، **لغة الصورة فى السينما المعاصرة**
إدوارد مرى، **عن النقد السينمائى الأمريكى**
جوزيف م. بوجز، **فن الفرجة على الأفلام**
سعيد شيمى، **التصوير السينمائى تحت الماء**
دوايت سوين، **كتابة السيناريو للسينما**
هاشم النحاس، **نجيب محفوظ على الشاشة**
يوجين فال، **فن كتابة السيناريو**
دانييل أريخون، **قواعد اللغة السينمائية**
كريستيان ساليه، **السيناريو فى السينما الفرنسية**
تونى بار، **التمثيل للسينما والتليفزيون**
آلان كاسبيار، **التذوق السينمائى**
بيتر نيكولز، **السينما الخيالية**

بول وارن، **خفايا نظام النجم الأمريكى**
دافيد كوك، **تاريخ السينما الروائية**
هاشم النحاس، **صلاح أبو سيف (محاورات)**
جان لويس بورى وآخرون، **فى النقد السينمائى الفرنسى**
محمود سامى عطاالله ، **الفيلم التسجيلى**
ستانلى جيه سولومون، **أنواع الفيلم الأمريكى**
جوزيف وهارى فيلدمان، **ديناميةِ الفيلم**
قدرى حفنى، **الإنسان المصرى على الشاشة**
مونى براح، **السينما العربية من الخليج إلى المحيط**
حسين حلمى المهندس، دراما الشاشة: **بين النظرية والتطبيق للسينما والتليفزيون (٢ج)**
جان بول كولين، **السينما الإثنوجرافية سينما الغد**
لويس هيرمان، **الأسس العملية لكتابة السيناريو للسينما والتليفزيون**
موريس إدجار كواندرو، نظرات فى الأدب **الأمريكى**
جوديث ويستون، **توجيه الممثل فى السينما والتليفزيون**
أحمد الحضرى، **تاريخ السينما فى مصر ج٢**

• ثامن عشر: كتب غيرت الفكر الإنسانى

سلسلة لتلخيص التراث الفكرى الإنسانى فى صورة عروض موجزة لأهم الكتب التى ساهمت فى تشكيل الفكر الإنسانى وتطوره مصحوبة بتراجم لمؤلفيه وقد صدر منها ١٠ أجزاء.

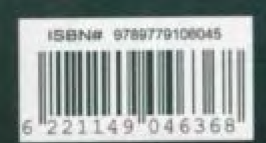
• تاسع عشر: الأعمال المختارة

يوهان هويزنجا، **أعلام وأفكار**
د. مصطفى طه بدر، **محنة الإسلام الكبرى**
ت. كويلر ينج، **الشرق الأدنى**
جيمس نيومان؛ ميشيل ويلسون، **رجال عاشوا للعلم**
ابن زنبل الرمال، **آخرة المماليك**
د. محمد عوض محمد، **نهر النيل**
يعقوب فام، **البراجماتية**
بلوطرخوس، **العظماء**
آرثر كريستنسن، **إيران فى عهد الساسانيين**
أوجست دييس، **أفلاطون**
آدم متز، **الحضارة الإسلامية(٢ج)**
تشارلز ديكنز، **مذكرات بكويك جـ١**
روبرت ديبوجراند وآخرون، **مدخل إلى علم لغة النص**
محمد كرد على، **بين المدنية العربية والأوربية**
ولفرد جوزف دللى، **العمارة العربية بمصر**

مقدمة فى علم الفلك هو توثيق متقن لمجمل ما مر به علم الفلك من تطور ولمجمل الأجرام السماوية؛ بدءًا بأصغر الأجرام وحتى الكواكب والنجوم والمجرات والتجمعات المجرية الفائقة. يعرضه المؤلف فى تصاعد درامى مثير فيبدأ بالتاريخ القديم لعلم الفلك ثم يبتعد عن كوكب الأرض تدريجيًا؛ ليناقش الكواكب الصخرية الأقرب فالمتعملقات الغازية فالشمس فالنجوم فالمجرات مرورًا بكافة التفاصيل.

أوليفييه إسلانجيه مؤلف هذا الكتاب، هو فيزيائى فلكى فرنسى من مواليد عام ١٩٧٠ ويقدم هذه الدراسة تحت اسم "مقدمة فى علم الفلك"، حيث يطرح بشكل أفقى كل قضايا علم الفلك الحديث وعلم الكونيات، مع درجة لا بأس بها من العمق. نص يبدأ بمقدمات تاريخية لنشأة علم الفلك والرصد الفلكى ثم ينتقل لتحليل كواكب المجموعة الشمسية، وينتقل بشكل ممنهج للنجوم فالمجرات والتكوينات الأكبر بالكون. رحلة طويلة فى سماء الليل تمر بأروع منعطفاتها على الإطلاق، وهو ثورة كوبرنيكوس الذى أقصى الأرض من موقعها المركزى الذى تخيله القدماء ليكشف مع العلم الحديث عن كون هائل بلا مركز ولا حافة ولا حدود، رحلة عبر أدوات علم الفلك الحديث وعلم الكونيات وتوثيق شامل شديد الإتقان والمنهجية لأحدث ما توصل إليه العلماء؛ ليصبح إضافة شائقة للمكتبة العلمية العربية.

تصميم الغلاف: العجيبة حسن


ISBN# 9789779108045
6 221149 046368

٥٢ جنيهًا

